



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica  
2010

**Luís Carlos Teixeira  
Vaz**

**SUPERVISÃO E CONTROLO REMOTO DA  
ILUMINAÇÃO NA VIA PÚBLICA**





**Luís Carlos Teixeira  
Vaz**

## **SUPERVISÃO E CONTROLO REMOTO DA ILUMINAÇÃO NA VIA PÚBLICA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e co-orientação do Professor Doutor Joaquim José Borges Gouveia, Professor Catedrático do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho a todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização do mesmo.



## **O júri**

Presidente

**Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientador

**Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Co-Orientador

**Prof. Doutor Joaquim José Borges Gouveia**

Professor Catedrático do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor Carlos Carneira**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico





## **Agradecimentos**

Deixo o meu agradecimento ao Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos e ao professor Doutor Joaquim José Borges Gouveia pela motivação e orientação científica deste trabalho.

Agradeço também a todos os colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para este trabalho. Destaco os colegas de laboratório Daniel Farinha, Emanuel Ávila e Marcos Gomes pela ajuda e pelas ideias que partilharam e os colegas Nelson Capela, Sérgio Pereira e Milton Grácio pelo companheirismo demonstrado ao longo do meu percurso académico.

Por último mas não menos importante, agradeço aos meus pais por sempre me terem apoiado e proporcionado as condições necessárias para chegar até aqui.

A todos, Muito Obrigado!



## Palavras-chave

Iluminação Pública, Supervisão e Controlo, Micro-controlador, Transdutor, Analisador de energia, ZigBee, PHP, HTML, Visual Basic, C.

## Resumo

Este trabalho teve como principal objectivo desenvolver e implementar o protótipo de um sistema de supervisão e controlo da iluminação da via pública. Foi desenvolvido um módulo de hardware que é constituído por um micro-controlador, um analisador de energia, um módulo de comunicações e um conjunto de dispositivos que permitem controlar o fluxo luminoso e bem como a medir os consumos de energia de cada luminária. O sistema é gerido a partir de uma central de comando na qual existe um computador com ligação à internet, para tal foi desenvolvida uma aplicação em Visual Basic e também um portal Web que conta com uma página de controlo e uma de supervisão. A comunicação entre a central e os pontos de iluminação fica a cargo de módulos *wireless* XBee que implementam o protocolo ZigBee. Toda a informação recolhida em cada ponto de iluminação é armazenada numa base de dado MySQL, para posterior consulta através do portal Web.

O protótipo desenvolvido mostrou ser fiável e adequado para a gestão de um sistema de iluminação da via pública, no entanto há aspectos que têm que ser melhorados, nomeadamente substituir o micro-controlador do módulo de *hardware* e adicionar mais sensores.



**Keywords**

Street Lightning, Supervision & Control, Microcontroler, Transducer, Energy Meter, ZigBee, PHP, HTML, Visual Basic, C.

**Abstract**

The main goal of this project was to develop and implement a prototype system for supervision and control of street lighting. Under development was a hardware prototype consisting of a micro-controller, an energy metering IC to measure the energy consumption of each lamp, a communications module and a set of devices to control the light flux. The system is managed from a computer with a Visual Basic Web server, which besides acquiring data from the lightning points, writes it on a MySQL database and allows the remote of the system through a Web page. There is also a statistics Web page, for further information access on the lamps energy consumption. The communication between the computer and the lighting points is achieved by XBee wireless modules that implement ZigBee protocol.

The prototype developed is robust and suitable for the management of public street lighting, however there are aspects that need improvement, such being the replacement of the micro-controller in the hardware prototype and addition of more sensors.



# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>i</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de acrónimos</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objectivos .....	3
1.4 Organização da Dissertação .....	4
<b>2 Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 Soluções existentes .....	5
2.1.1 Sistemas de controlo e regulação de fluxo luminoso .....	5
2.1.2 Sistemas de monitorização remota .....	11
2.1.3 Casos de estudo .....	14
2.2 Resumo .....	17
<b>3 Tecnologias de suporte</b>	<b>19</b>
3.1 Protocolos e tecnologias de comunicação .....	19
3.2 Microcontroladores .....	27
3.3 Transdutores .....	28
3.4 Analisadores de energia .....	30
3.5 Técnicas de regulação de fluxo luminoso .....	31
<b>4 Solução proposta</b>	<b>37</b>
4.1 Arquitectura da solução proposta .....	37
4.2 Hardware .....	39
4.3 Cálculos auxiliares .....	47
4.4 Software .....	50
<b>5 Implementação e Análise de desempenho</b>	<b>55</b>
5.1 Implementação .....	55
5.2 Análise de desempenho .....	59
<b>6 Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>61</b>
<b>Apêndice A Configuração dos módulos XBee</b>	<b>65</b>

<b>Apêndice B</b>	<b>Memória EEPROM com interface SPI</b>	<b>73</b>
<b>Apêndice C</b>	<b>Interface SPI do analisador MCP3909</b>	<b>87</b>
<b>Referências</b>		<b>101</b>



# Lista de Figuras

1.1	Poluição luminosa .....	2
1.2	Consumos de electricidade em Portugal .....	3
2.1	Equipamento Compacto® .....	6
2.2	Ciclo de iluminação pré-programado .....	6
2.3	Equipamento Atron® / Bipall® .....	8
2.4	Variação da temperatura de cor em função da carga aplicada à lâmpada .....	9
2.5	Equipamento Augier-Box .....	11
2.6	Exemplo de comunicação GSM/GPRS/PLC .....	12
2.7	Exemplo de comunicação de dados Digi TransPort® .....	13
2.8	Arquitectura da solução SmartLi® .....	14
2.9	Interface Web do projecto ge.IP .....	17
3.1	Exemplo de barramento CAN .....	20
3.2	Estrutura de uma mensagem CAN standard .....	20
3.3	Rede de dispositivos Bluetooth .....	22
3.4	Exemplo de rede PLC .....	23
3.5	Topologias de rede ZigBee .....	24
3.6	Arquitectura da rede GSM .....	26
3.7	Diagrama de blocos PIC .....	28
3.8	(a) Transdutor de corrente por de efeito de Hall; (b) Resistência de shunt .....	29
3.9	Transdutor de tensão por efeito de Hall .....	29
3.10	Diagrama de blocos do analisador de energia MCP3909 da Microchip .....	31
3.11	Modulação por largura de pulso .....	31
3.12	Ângulo de disparo .....	32
3.13	Auto-transformador variável .....	33
3.14	Sistema de injeção de tensão em oposição de fase .....	34
3.15	Injeção de tensão em oposição de fase .....	35
4.1	Arquitectura da solução proposta .....	38
4.2	Arquitectura do módulo de hardware .....	41

4.3	Esquema eléctrico do módulo de hardware .....	42
4.4	Esquema eléctrico do módulo de hardware (Transdutores e MCP3909) .....	43
4.5	Diagrama de pinos do transdutor LTS15-NP .....	43
4.6	Esquema eléctrico da fonte de alimentação .....	45
4.7	Diagrama de fluxo do software .....	46
4.8	Esquema eléctrico da placa de comunicação com o PC .....	47
4.9	Diagrama de interacção entre os vários <i>software</i> .....	50
4.10	Diagrama de fluxo da aplicação VB .....	51
5.1	Pontos de iluminação implementados no laboratório .....	55
5.2	Módulo de <i>hardware</i> .....	56
5.3	Interface da aplicação VB .....	57
5.4	Interface Web de controlo .....	58
5.5	Interface Web de supervisão .....	58
A.1	Módulo XBee e XBee-Pro .....	65
A.2	Diagrama de pinos do módulo XBee .....	66
A.3	Ligação entre o computador e o módulo XBee .....	67
A.4	Configuração da comunicação entre o computador e o módulo XBee .....	68
A.5	Configuração do módulo XBee .....	68
A.6	Troca de mensagens entre o PC e o módulo XBee .....	72
B.1	Barramento SPI .....	74
B.2	Mensagem SPI analisada no osciloscópio .....	75
B.3	Modos SPI suportados pela EEPROM .....	76
B.4	Diagrama de pinos da EEPROM .....	77
B.5	Organização da EEPROM .....	78
B.6	Status Register .....	78
B.7	Instrução Read Identification .....	80
B.8	Instrução Read Status Register .....	80
B.9	Instrução Write Page .....	81
B.10	Registo SSPSTAT do micro-controlador .....	82
B.11	Registo SSPCON do micro-controlador .....	82
B.12	Sequência de mensagens para ler o Status Register .....	84

C.1 Diagrama de pinos do analisador .....	87
C.2 (a) Instrução SPI; (b) Instrução SPI .....	89
C.3 Multiplier Output mode .....	90
C.4 (a) Dual Channel mode .....	90
C.4 (b) Troca de mensagens SPI .....	91
C.5 Filter Input mode .....	91
C.6 Diagrama de fluxo do software do micro-controlador .....	92
C.7 Estrutura de dados devolvidos pelo analisador .....	94
C.8 Resultado da comparação lógica .....	94



# Lista de Tabelas

3.1 Mensagem Ethernet definida pelo padrão IEEE 802.3 .....	21
4.1 Estrutura da mensagem de comando .....	38
4.2 Estrutura da mensagem de dados .....	39
4.3 Comparação entre vários modelos de analisadores de energia .....	40
5.1 Lista dos componentes principais do módulo de hardware e respectivo custo .....	66
A.1 Características técnicas do módulo XBee .....	62
A.2 Parâmetros necessários para configurar um módulo XBee .....	70
A.3 Mensagens de resposta do módulo XBee .....	71
A.4 Configuração dos módulos XBee .....	72
C.1 Programmable Gain Amplifier .....	88
C.2 Exemplos de notação de complemento para 2 .....	97



# Lista de Acrónimos

ADC	Analogic to Digital Converter
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
CAN	Controller Area Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HPS	Vapor de Sódio de Alta Pressão (High Pressure Sodium)
HTML	HiperText Markup Language
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IC	Integrated Circuit
IR	Infra-Vermelho (Infrared)
ISM	Industrial Scientific and Medical
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MH	Iodetos Metálicos (Metal Halide)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PCB	Printed Circuit Board
PHP	Hypertext Preprocessor
PLC	Power Line Communications
RMS	Root Mean Square
RF	Rádio Frequência
SCADA	Supervision Control And Data Acquisition
SD	Secure Digital
SMS	Short Message Service
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
USB	Universal Serial Bus
VB	Visual Basic
XML	Extended Markup Language





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

A iluminação pública assume um papel bastante importante no desenvolvimento de uma sociedade. Permite que veículos e peões circulem em segurança na via pública durante o período nocturno, inibe a criminalidade e também tem como objectivo realçar monumentos, jardins ou outros espaços de lazer. Um bom projecto de iluminação pública deve assegurar que os peões tenham uma boa visibilidade dos limites do espaço onde circulem e também a inexistência de zonas de pouca luminosidade. No caso dos veículos deve ser assegurado que estes detectem com facilidade eventuais obstáculos na via [TEIXEIRA, 2003].

Uma rede de iluminação pública convencional é constituída essencialmente por um sistema de controlo, que liga e desliga a iluminação em períodos definidos por um relógio astronómico ou crepuscular, uma rede de distribuição de energia e por pontos de iluminação. Por sua vez, os pontos de iluminação são constituídos uma ou mais lâmpadas e um conjunto de equipamentos eléctricos e mecânicos necessários para seu funcionamento, nomeadamente a luminária, o balastro e estrutura de suporte, vulgo “poste”.

A luminária serve de suporte e protecção da lâmpada, para além disso permite direccionar o fluxo luminoso para onde é realmente necessário e assim melhorar o rendimento global do ponto de iluminação.

O balastro, que pode ser do tipo magnético ou electrónico, é um dispositivo necessário ao funcionamento de determinados tipos de lâmpadas, mais concretamente lâmpadas de descarga em gases. Este equipamento tem como principais funcionalidades fornecer uma sobretensão durante o arranque da lâmpada e limitar a corrente durante o funcionamento.

A estrutura de suporte poderá ser necessária ou não. Por exemplo no caso de iluminação de monumentos em que são utilizados projectores ao nível do solo, ou no caso de iluminação em túneis rodoviários em que as armaduras são fixadas nas paredes do túnel.

Em iluminação pública são utilizados vários tipos de lâmpadas, sendo que na sua maioria trata-se de lâmpadas de descarga em gases por serem mais eficientes que lâmpadas de

halogéneo e mesmo que os LED. No entanto os LED são uma tecnologia relativamente recente e em desenvolvimento, o rendimento luminoso tem vindo a ser melhorado e segundo alguns autores é apresentado como o futuro da iluminação [SCHREDER, 2008].

## 1.2 Motivação

Segundo [DEURSEN, 2006] cerca de um terço dos sistemas de iluminação pública Europeus são obsoletos e pouco eficientes. Estima-se que se os sistemas de iluminação ineficientes da Europa, nos sectores doméstico, público e privado fossem substituídos por soluções mais eficientes, as poupanças financeiras poderiam alcançar os 4.300 milhões de euros anuais bem como uma redução de 28 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

A falta de controlo nos sistema de iluminação pública e a utilização de luminárias pouco eficientes resulta num cenário de poluição luminosa, o qual é possível verificar na Figura 1.1. Esta imagem de satélite demonstra que a Europa e os Estados Unidos apresentam os maiores índices de poluição luminosa. Este tipo de poluição é muito criticado pelos astrónomos uma vez que interfere directamente com o seu trabalho, para além disso o excesso de luminosidade altera os hábitos nocturnos de animais e de pessoas [ASTERPORTAL, 2009].

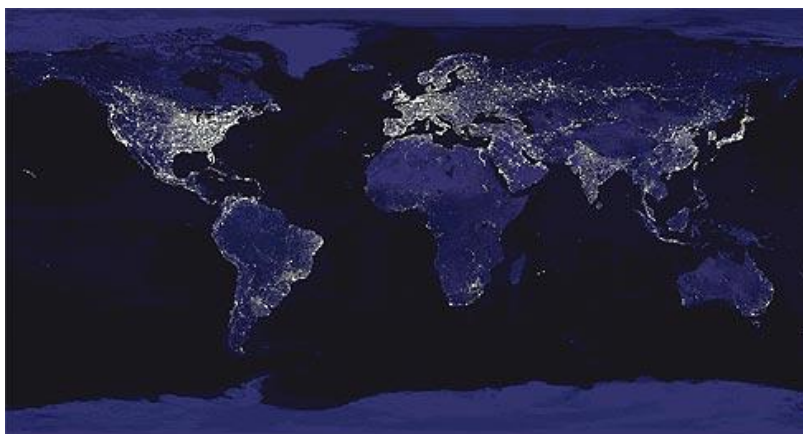


Figura 1.1: Poluição luminosa.

No ano de 2008 a iluminação pública representou cerca de 3.3% dos consumos de electricidade em Portugal (Figura 1.2). Embora o valor apresentado não seja muito significativo quando comparado com os restantes sectores, ainda assim representa um consumo de energia que ronda os 1642 GWh e que em termos financeiros ascende os 135 milhões de euros, valor calculado com base na tarifa de 2008 [DGEG, 2008]. Outro aspecto preocupante é

o facto do consumo de energia dos sistemas de iluminação pública apresentar uma tendência de subida desde 1994.

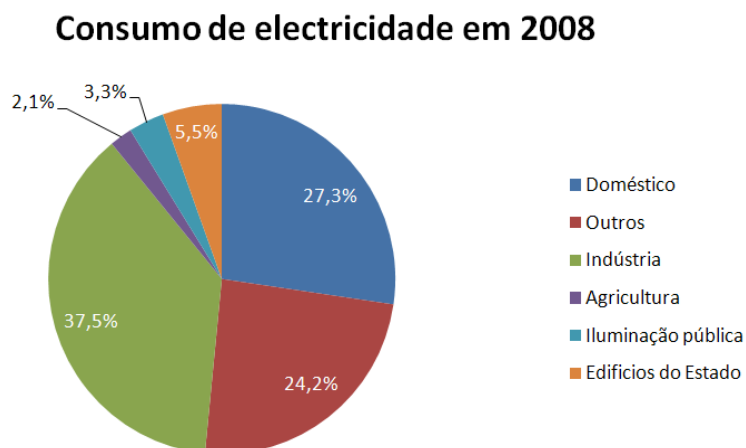


Figura 1.2: Consumos de electricidade em Portugal [PORDATA, 2010].

Pelos motivos que foram apresentados, torna-se necessário intervir na área da iluminação pública. O aumento da eficiência energética nos sistemas de iluminação pública leva não só a uma redução do consumo de energia e do nível de poluição luminosa, como também a uma poupança económica considerável. Este aumento pode passar pela simples troca de lâmpadas e equipamentos obsoletos por tecnologia mais eficiente, até sistemas de controlo de iluminação mais eficazes que os existentes.

### 1.3 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é desenvolver e implementar em laboratório o protótipo de um sistema de supervisão e controlo da iluminação da via pública. Deste deve fazer parte o *hardware* de controlo e monitorização e uma aplicação de software que permita gerir o sistema de iluminação.

O protótipo deve permitir o controlo individual ou de um conjunto de luminárias, bem como medir e armazenar a energia consumida por cada luminária e também detectar eventuais avarias da lâmpada. Na aplicação de *software* deve constar uma base de dados na qual são armazenados os dados recolhidos para posterior consulta. Pretende-se que o sistema

de iluminação possa ser controlado a partir de uma aplicação local e também através de um portal Web.

A fiabilidade e o baixo custo são duas características pretendidas para este protótipo, pelo que a escolha dos dispositivos que constituem o *hardware* deve de ser feita de forma a conseguir uma boa relação entre custo e características técnicas.

## **1.4 Organização da Dissertação**

Esta Dissertação está organizada em seis capítulos e três apêndices.

No capítulo dois são apresentados vários exemplos de sistemas de supervisão e controlo da iluminação da via pública. São apresentadas as principais características de cada sistema e no final é feito um pequeno resumo dos sistemas abordados.

No capítulo três são apresentadas algumas das tecnologias que foram consideradas para este trabalho. São apresentados os principais aspectos de cada tecnologia procurando destacar as vantagens e desvantagem de cada uma.

No capítulo quatro é apresentado o estudo conceptual da solução proposta. É feita uma descrição da arquitectura adoptada bem como do *hardware* e *software* desenvolvidos.

No capítulo cinco é descrita a implementação do protótipo. São apresentadas as interfaces de controlo, local e remota, e também o módulo de hardware desenvolvido. Neste capítulo são ainda discutidas algumas opções tomadas ao longo do trabalho.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões deste trabalho e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices é explicado em pormenor o funcionamento de dois dispositivos utilizados neste trabalho e um outro que foi considerado mas que acabou por não ser utilizado. No apêndice A é descrito o módulo de comunicações XBee, no apêndice B é descrito o funcionamento de uma memória EEPROM com interface SPI e no apêndice C é descrita a interface SPI do analisador de energia MCP3909.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

No que diz respeito a sistemas de supervisão e controlo da rede de iluminação da via pública são vários os exemplos que podem ser apresentados. Existem no mercado sistemas com diversas funcionalidades, desde os que apenas permitem efectuar o controlo, monitorização local ou de transporte de dados, até soluções integradas que permitem efectuar o controlo e supervisão remota do sistema de iluminação pública.

Neste capítulo são apresentados alguns dos sistemas referidos bem como três casos de estudo nos quais são ou irão ser aplicados sistemas de controlo e supervisão de iluminação pública.

### 2.1 Soluções existentes

#### 2.1.1 Sistemas de controlo e regulação do fluxo luminoso

Nesta secção é referido por diversas vezes o parâmetro luminotécnico denominado fluxo luminoso. Trata-se de um parâmetro característico de uma fonte de luz e é definido como a quantidade de luz emitida por unidade temporal. A unidade de medida é o lúmen (lm) [TEIXEIRA, 2003].

#### **Compacto®**

O sistema Compacto® (ver Figura 2.1), desenvolvido e produzido pela empresa Francesa Augier SAS [Augier, 2010], trata-se de variador electrónico de tensão que permite variar e regular a tensão aplicada a um conjunto de lâmpadas.



Figura 2.1: Equipamento Compacto®.

À semelhança de outros sistemas estudados durante a pesquisa bibliográfica, este sistema utiliza uma técnica de injeção de tensão em oposição de fase<sup>1</sup> para variar a tensão à saída do equipamento. De certa forma, pode-se afirmar que este equipamento é uma fonte de alimentação regulável que alimenta um conjunto de lâmpadas, permitindo assim reduzir a potência fornecida às lâmpadas e por consequência reduzir o fluxo luminoso bem como o consumo de energia [COMPACTO, 2010].

O modo de operação deste sistema é baseado em ciclos pré-programados de iluminação (ver Figura 2.2). É feita uma distinção entre dias da semana e dias de fim-de-semana, e são consideradas quatro estações de três meses cada. Adicionalmente poderá ser programado um ciclo de operação diferente durante oito dias por ano [COMPACTO, 2010].

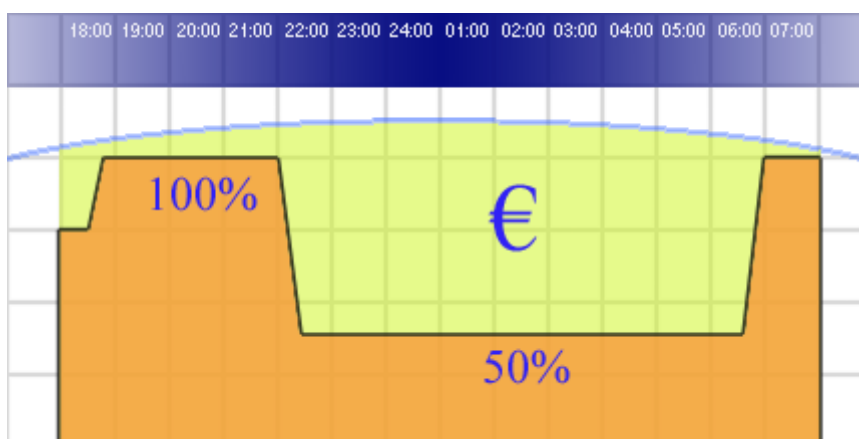


Figura 2.2: Ciclo de iluminação pré-programado.

<sup>1</sup> Para saber mais sobre esta técnica deve ser consultado o Capítulo 3: Técnicas de regulação de fluxo luminoso.

A Figura 2.2 apresenta um exemplo, meramente ilustrativo, de um ciclo de iluminação pré-programado. Inicialmente, após a iluminação pública ser ligada, tem-se uma fase de pré-aquecimento das lâmpadas a uma tensão inferior à tensão nominal, facto este que segundo o fabricante aumenta em 30% o tempo de vida útil das lâmpadas. De seguida, durante o período nocturno de maior movimento na via pública o sistema fornece a tensão nominal às lâmpadas. Durante a noite, quando o movimento na via pública é reduzido ou inexistente, o sistema reduz a tensão aplicada às lâmpadas para 75% ou 50% da tensão nominal, sendo precisamente neste período é efectuada a poupança de energia. De madrugada, quando retorna o movimento à via pública, é fornecido às lâmpadas a tensão nominal até que a iluminação se desligue.

A configuração dos ciclos de iluminação é feita através de um software apropriado e de um computador que comunica com o equipamento através de uma porta USB. É possível configurar parâmetros tais como rampas de tensão (transição entre dois níveis de tensão) ou tempos entre cada transição. De salientar que a configuração do equipamento só poderá ser feita caso este se encontre desligado, tratando-se este procedimento de uma medida de segurança [COMPACTO, 2010].

O fabricante afirma que com este equipamento é possível obter poupanças energéticas na casa dos 30% a 45%, para lâmpadas de HPS (Vapor de Sódio de Alta Pressão) e MH (Iodetos Metálicos) e ao mesmo tempo um aumento do tempo de vida útil das lâmpadas. O equipamento está disponível nas versões de 3 a 9kVA (monofásico) e de 9 a 27kVA (trifásico) [COMPACTO, 2010].

De seguida serão apresentadas as principais características deste equipamento (versão monofásica):

- Alimentação: 230V  $\pm$ 10% (45Hz a 65Hz).
- Potência: 0 - 9kVA.
- Variação da potência fornecida entre 0 e 100%.
- Funciona com todos os tipos de lâmpadas.
- Eficiência de 98,5%.
- Protecção térmica e de curto-circuito.
- By-pass automático.
- Indicação do estado através de indicadores LED (ON, Fault e Modo de economia).

## Atron®/ Bipall®

Atron® e Bipall® são dois equipamentos que fazem parte de uma solução de controlo de fluxo luminoso apresentada pelo fabricante Francês Abel [ABEL, 2010]. O equipamento Altron® trata-se de um balastro electrónico que oferece a possibilidade de controlar a potência fornecida à lâmpada [ALTRON, 2010]. O equipamento Bipall® é um temporizador que controla o balastro e que permite variar a potência fornecida à lâmpada seguindo ciclos de iluminação pré-programados. Os dois equipamentos em conjunto constituem um sistema de controlo de fluxo luminoso autónomo e independente. Ao contrário do sistema Compacto® apresentado anteriormente, que controla um conjunto de lâmpadas, este sistema controla apenas uma lâmpada (ver Figura 2.3).



Figura 2.3: Equipamento Atron® / Bipall®.

Na documentação consultada [ALTRON, 2010] sobre este sistema não consta a técnica utilizada para controlar a potência fornecida à lâmpada.

Os equipamentos referidos permitem controlar lâmpadas de HPS e MH e estão divididos em duas gamas de potência, de 60 a 150W e de 250 a 400W. Para a primeira gama, o equipamento Bipall® está integrado no mesmo módulo do Altron®, para a segunda gama de potência o equipamento Bipall® encontra-se num módulo separado, e para cada tipo de



lâmpada e gama de potência deverá ser seleccionado um equipamento específico [ALTRON, 2010].

O modo de operação deste sistema é em tudo semelhante ao apresentado anteriormente. O equipamento Bipall® permite seguir até quatro ciclos de iluminação pré-programados e segundo o fabricante as poupanças energéticas estão compreendidas entre 21% e 38%. O equipamento poderá ainda ser disponibilizado com um ciclo de iluminação personalizado e de acordo com os requisitos do cliente.

O Bipall® tem um contador interno que regista os tempos de funcionamento da iluminação pública. A partir do momento em que é instalado demora entre dois a quatro dias até se sincronizar com os outros equipamentos Bipall® com base numa média dos tempos registados. Este processo torna-se necessário para que todas as luminárias tenham o mesmo comportamento no que diz respeito a variações do fluxo luminoso. Após o período de sincronização o equipamento começa de imediato a executar os ciclos de iluminação pré-programados [ALTRON, 2010].

Segundo o fabricante a diminuição da potência aplicada à lâmpada provoca um aumento da temperatura de cor. Através da Figura 2.4 é possível demonstrar este comportamento para o caso de uma lâmpada de MH com uma potência de 70W.

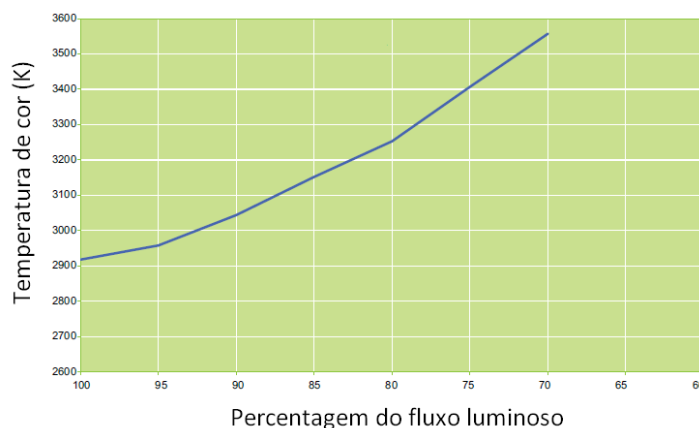


Figura 2.4: Variação da temperatura de cor em função da carga aplicada à lâmpada.

Seguidamente são apresentadas as principais características deste equipamento.

- Alimentação: 180 - 250V (50Hz a 60Hz).
- Potência: 60 - 150W e 250 - 400W.

- Variação da potência fornecida entre 0 e 100%. (Em 6 níveis para potências até 150W e 4 níveis para potências superiores a 250W).
- Funciona com lâmpadas de HSP e MH.
- Protecção térmica e de curto-circuito.
- Aumento do tempo de vida útil das lâmpadas entre 20% a 40%.
- Indicação do estado através de indicadores LED.
- A programação do equipamento é feita na fábrica.

## **CEP/Tev2**

Os reguladores de fluxo luminoso CEP/TEV, comercializados pela empresa Portuguesa Tev2, permitem obter poupanças energéticas até 50%. À semelhança dos sistemas apresentados anteriormente, o modo de operação do CEP/TEV baseia-se em ciclos pré-programados de iluminação, no entanto oferece a possibilidade de ser controlado com base na informação fornecida por uma foto célula.

Este sistema recorre a um auto-transformador<sup>2</sup> para variar a tensão à saída do equipamento, sendo este aspecto a principal diferença face ao primeiro sistema apresentado, o Compacto®.

De seguida são apresentadas as principais características deste equipamento.

- Alimentação trifásica: 350 - 420V (48Hz a 52Hz).
- Potência: 6 – 60kVA.
- Variação da potência fornecida entre 0 e 100%.
- Funciona com todo o tipo de lâmpadas.
- Eficiência: 98,5% (em plena carga).
- Aumento do tempo de vida útil das lâmpadas.

## **Outros sistemas**

Em [ANDRÉ, 2004]<sup>3</sup> é apresentado o protótipo de um balastro electrónico para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. O autor desenvolveu um balastro que permite alimentar as lâmpadas a alta frequência e eliminar o efeito de ressonância acústica. O balastro

---

<sup>2</sup> Para saber mais sobre esta técnica deve se consultado o Capítulo 3: Técnicas de regulação de fluxo luminoso.

<sup>3</sup> Tese de doutoramento

desenvolvido é controlado por um micro-controlador e permite também regular a potência fornecida às lâmpadas.

### 2.1.2 Sistemas de monitorização remota

#### Augier-box®

O equipamento Augier-box® (Figura 2.5) permite monitorizar o estado e consumos de energia de uma rede de iluminação pública. Sempre que ocorre um evento anormal, por exemplo um pico de tensão, na rede de iluminação pública é enviada uma SMS de alarme para os números que estão armazenados na sua memória. Também é possível consultar as medições efectuadas via GSM/GPRS. Este equipamento suporta ainda os protocolos de comunicação CAN, RS485 e USB. A porta de comunicações USB é utilizada para configurar o equipamento, sendo que as restantes são para comunicar com equipamentos de controlo de fluxo do fabricante Augier, nomeadamente o Compacto® [AUGIER-BOX].

Cada equipamento possui um relógio astronómico que associado a um relé permite controlar o contactor principal que liga e desliga a iluminação. Cada Augier-box® pode ser configurada com um código de identificação bem como coordenadas geográficas que servem de referência para o relógio astronómico e para geo-localização [AUGIER-BOX].



Figura 2.5: Equipamento Augier-Box.

#### Opera

O sistema Opera desenvolvido pela empresa Italiana Reverberi Enetec [OPERA, 2010] permite efectuar a monitorização de uma rede de iluminação pública. A supervisão é feita a

partir de uma central utilizando um computador com o software adequado. Este sistema propõe essencialmente dois tipos equipamento.

- O equipamento DAC (*Data Acquisition Controller*) trata-se módulo que é instalado no armário central que controla a iluminação pública. Permite recolher vários parâmetros tais como tensão, corrente, factor de potência entre outros, e armazena-os na sua memória. Este equipamento possui uma porta de comunicações RS232 e pode ser conectado directamente a um computador ou a um modem GSM, sendo este o protocolo de comunicações utilizado para trocar informação com a central. Caso ocorram eventos anormais no sistema de iluminação é enviado um SMS de alerta para um número predefinido [OPERA, 2010].
- O LPS (*Lightning Point Sentinel*) trata-se de um equipamento que é instalado junto de cada luminária. Tal como o DAC permite recolher vários parâmetros da rede, no entanto a informação é enviada para um módulo concentrador que está instalado no armário central através de PLC (*Power Line Communication*). Posteriormente o módulo envia a informação para a central através de GSM. Através da Figura 2.6 é possível demonstrar uma aplicação deste sistema.

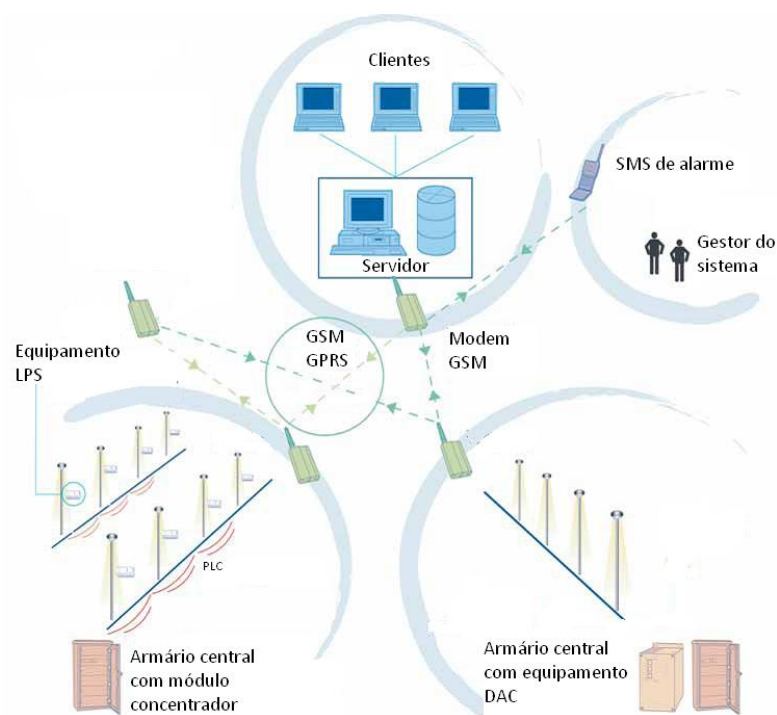


Figura 2.6: Exemplo de comunicação GSM/GPRS/PLC.

## Digi TransPort®

O Digi TransPort® é uma solução de comunicação de dados, apresentada pelo fabricante Digi International® que pode ser integrada num sistema de monitorização de um sistema de iluminação pública. O fabricante afirma que o GPRS é a melhor solução de comunicação de dados em sistemas de controlo e monitorização [DIGI, 2010]. Na solução apresentada os vários pontos de iluminação estão ligados a um módulo concentrador através de uma rede Ethernet. A comunicação de dados entre o concentrador e a central de comando é feita com recurso a um router GPRS (ver figura 2.7).

Este sistema foi implementado pela empresa Hafslund, a principal distribuidora de energia Norueguesa [DIGI, 2010]. O sistema implementado por esta empresa conta ainda com outras tecnologias de controlo e monitorização do sistema de iluminação bem como luminárias que utilizam a tecnologia LED. Em seis anos de aplicação destas tecnologias foi observada uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 70%, sendo previsível que atinja os 80% [WORDSWORTH, 2010].

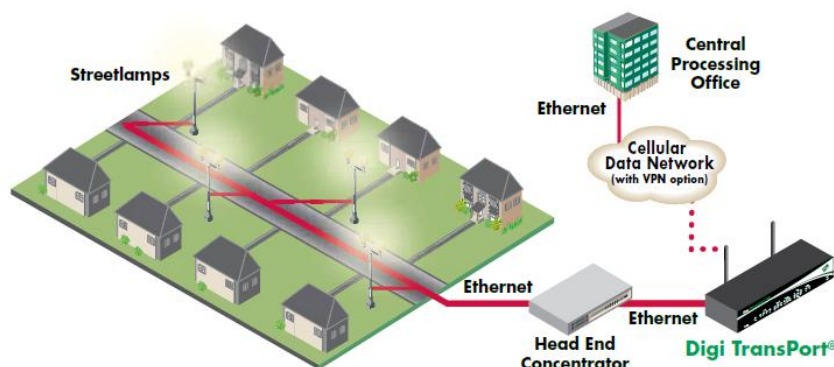


Figura 2.7: Exemplo de comunicação de dados Digi TransPort®.

## Outros sistemas

Em [TRAVASSOS, 2008]<sup>4</sup> é apresentado um sistema de monitorização de consumos numa estação de radiocomunicações móveis da Vodafone. O protótipo desenvolvido permite monitorizar em tempo real os consumos de diversos equipamentos na estação móvel bem como as respectivas temperaturas de funcionamento.

<sup>4</sup> Dissertação de Mestrado

Para obter os consumos é proposto utilizar um micro-controlador para processar os dados fornecidos por transdutores de tensão e corrente, depois de devidamente tratados por hardware auxiliar. O protótipo permite ainda armazenar os dados recolhidos numa memória SD e apresentar os dados num ecrã LCD.

### 2.1.3 Casos de estudo

#### SmartLi

O projecto SmartLi® levado a cabo pela empresa Portuguesa TEC-IT apresenta uma solução integrada de controlo e supervisão do sistema de iluminação pública. O controlo e a monitorização são feitos ponto a ponto. Em cada luminária será colocado um equipamento que tem a capacidade de controlar o fluxo luminoso e medir alguns parâmetros da rede, entre outras funcionalidades. Esta solução tal como as apresentadas anteriormente segue um ciclo de iluminação pré-programado, no entanto é aplicado o conceito de “*Adaptive Lightning*”, ou seja, adaptar o fluxo luminoso às necessidades momentâneas de luminosidade [SMARTLI, 2010].

A Figura 2.8 mostra a arquitectura da solução SmartLi®.



Figura 2.8: Arquitectura da solução SmartLi®.

O controlo e supervisão do sistema de iluminação é feito a partir de uma central, nesta encontra-se um computador com o software adequado responsável pela troca de mensagens através de GSM com um dos módulos terminais que está inserido na rede de iluminação,

representado na Figura 2.8 por “unidade central de processamento”. O módulo que troca mensagens com a central reenvia a informação, caso seja necessário, para os módulos seguintes por radiofrequência (RF). Da mesma forma, as mensagens que fluem em sentido contrário são reenviadas até chegarem à central. Por sua vez quando chegam dados à central é são armazenados numa base de dados.

São anunciadas poupanças de energia na ordem dos 40% a 70% em instalações de iluminação que utilizem a lâmpadas do tipo Vapor de Sódio de alta Pressão (HPS). O equipamento está preparado à partida para operar com luminárias que utilizam a tecnologia LED [SMARTLI, 2010]. De seguida são apresentadas as principais características da solução SmartLi®.

- Controlo horário e/ou por luminosidade.
- Controlo por detecção de movimento.
- Regulação da luminosidade de acordo com a utilização da zona.
- Envio diário dos consumos por luminária para a base de dados.
- Leitura da luminosidade pela “unidade central de processamento”.
- Detecção de vandalismo ou roubo do equipamento do poste.
- Detecção de viaturas em sentido contrário nos acessos das auto-estradas.
- Ligação progressiva da iluminação em função da luz natural.

As referências consultadas não permitem apurar se esta solução já foi implementada ou se ainda se encontra em fase de projecto.

### **Projecto Lites**

O projecto Lites pretende apresentar uma solução inteligente de controlo e supervisão da iluminação pública em que as luminárias utilizam a tecnologia LED. Este projecto conta com a parceria da empresa Mertercom, a qual já disponibiliza um sistema inteligente de controlo de iluminação pública baseado na tecnologia LED, o DATALED52. No entanto o projecto Lites pretende apresentar uma solução mais sofisticada, nomeadamente ao nível da supervisão do sistema de iluminação [LITES, 2010].

Em cada luminária, um equipamento permitirá adaptar o fluxo luminoso de acordo com as necessidades momentâneas. O ajuste é feito com base na informação recolhida por diversos

sensores, nomeadamente sensores de luminosidade e movimento. Este equipamento também permitirá medir os consumos de energia bem como outros parâmetros relevantes.

Na solução que será apresentada um *gateway* inserido num armário eléctrico comunica com a central utilizando uma ligação à internet. A comunicação entre o *gateway* e os equipamentos de cada luminária é feita através de PLC. Os dados recolhidos por cada equipamento são enviados para a central e processados num software adequado. Com este sistema as poupanças energéticas poderão atingir os 70% [LITES, 2010].

No decorrer do projecto Lites está prevista a instalação de duzentos pontos de iluminação que utilizam esta tecnologia. Serão distribuídos por quatro países, sendo que cinquenta destes pontos de iluminação serão instalados no Campus Universitário da Universidade de Aveiro.

### **ge.IP**

O ge.IP é um dos projectos piloto da Agência Municipal de Energia de Gaia. A Energaia fundada em 1999 tem como objectivo implementar políticas energéticas e projectos de forma a tornar o Município de Vila nova de Gaia como um exemplo de sustentabilidade e de gestão de recursos energéticos [ENERGAIA, 2010].

O projecto apresentado visa melhorar a gestão do sistema de iluminação pública. Em cada luminária é colocado com um equipamento que tem a capacidade de regular o fluxo luminoso. Este dispositivo permite ainda detectar anomalias, medir consumos e outro tipo de parâmetros e também registar o número de horas de funcionamento da lâmpada. No armário central da rede de iluminação é colocado um dispositivo que controla os pontos de iluminação, e comunica com estes através de um protocolo normalizado.

O sistema de iluminação é controlado a partir de um portal Web. A comunicação entre o portal e controlador dos pontos de iluminação é feita segundo o protocolo TCP/IP através de uma das seguintes tecnologias: GPRS, ADSL, Wi-MAX, Wi-Fi ou BPL.

Na aplicação Web o utilizador tem a possibilidade de controlar o sistema de iluminação e também consultar o histórico de consumos, tempos de funcionamento das lâmpadas, avarias no sistema de iluminação, entre outros parâmetros. A Figura 2.9 mostra o aspecto da interface Web.





Figura 2.9: Interface Web do projecto ge.IP.

A interface Web permite trabalhar sobre plataformas de visualização de mapas online, o que permite localizar os pontos de iluminação numa determinada zona através de geo-referenciação [ENERGAIA, 2010]. Com esta solução a poupança energética é cerca 49%, associado a uma redução com as despesas de manutenção estimada em cerca de 98%, a redução total dos custos com a iluminação pública ronda os 53%.

## 2.2 Resumo

Após estudar alguns sistemas de controlo e/ou supervisão do sistema de iluminação pública chega a altura de fazer um resumo das características dos sistemas estudados. Durante a pesquisa foram encontrados essencialmente três tipos de sistemas,

- Sistemas de controlo.
- Sistemas de monitorização.
- Sistemas que integram controlo e monitorização com software de gestão.

No que diz respeito ao controlo e monitorização são feitas duas abordagens,

- **Individual**, em que cada ponto de iluminação é controlado/monitorizado de forma independente.
- **Centralizado**, em que é controlado/monitorizado um conjunto de pontos de iluminação a partir do armário central do sistema de iluminação pública.

Os sistemas estudados utilizam diferentes tecnologias de comunicação sendo que as mais utilizadas são o GSM/GPRS e o PLC. No que diz respeito a poupanças de energia, estas variam entre os 21% e os 50%. Estes valores são estimados tendo como referência uma determinada rede de iluminação sem sistema de controlo instalado e a mesma rede com sistema proposto pelo fabricante, por este motivo não devem ser utilizados para comparar sistemas de fabricantes diferentes uma vez que o cálculo pode ser baseado em redes de iluminação com características diferentes.

## Capítulo 3

# Tecnologias de suporte

### 3.1 Protocolos e tecnologias de comunicação

#### CAN

O protocolo CAN (*Controller Area Network*) foi desenvolvido por Robert Bosch em meados da década de oitenta para aplicações na indústria automóvel. Actualmente é utilizado em muitas aplicações industriais e de domótica por se tratar de um protocolo robusto e fiável.

Numa rede CAN dois ou mais nós estão ligados a um barramento comum. Estes não possuem endereço, quando um nó envia uma mensagem todos os nós da rede recebem essa mensagem, no entanto a mensagem é interpretada para que cada nó identifique se a mensagem se destina a ele ou não. Para evitar o conflito de mensagens é utilizado o CSMA/CR (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Resolution*). Quando um nó do barramento pretende enviar uma mensagem verifica o estado do barramento antes de enviar a mensagem e só envia se estiver livre. Se eventualmente ocorrer uma colisão de mensagens, ou seja, dois nós enviaram uma mensagem ao mesmo tempo, é iniciado um processo de arbitragem e nessa altura é enviada a mensagem de maior prioridade. Uma mensagem prioritária é aquela cujo identificador corresponde ao menor número binário [TEXAS, 2010].

O meio de transmissão de dados mais comum é um par de fios entrançados sendo que o comprimento do barramento está dependente da velocidade de transmissão de dados. A velocidade máxima de transmissão está definida para 1Mbit/s enquanto que o comprimento máximo de um barramento CAN ronda os 1000m. Para barramentos com mais de 100m pode ser aplicada uma relação entre a velocidade de transmissão de dados e seu comprimento, tal como mostra a equação 1 [TEXAS, 2008].

$$\text{Bit rate (Mbit/s)} * \text{comprimento do barramento (m)} \leq 50 \quad (1)$$

A figura 3.1 mostra o exemplo de um barramento CAN em que vários nós estão ligados ao barramento. Nos terminais do barramento devem ser colocadas resistências de valor de  $120\Omega$ , representadas na Figura 3.1 por  $R_L$ .

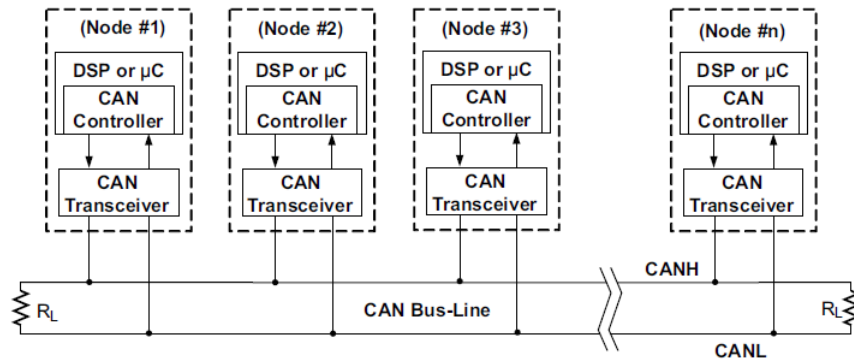


Figura 3.1: Exemplo de barramento CAN [TEXAS, 2008].

Existem dois tipos de mensagens CAN, o tipo “standard” em que o identificador tem 11 bits e o tipo “extended” em que o identificador tem 29 bits. As mensagens são constituídas por vários campos, a Figura 3.2 mostra a estrutura de uma mensagem “standard”.



Figura 3.2: Estrutura de uma mensagem CAN *standard* [TEXAS, 2010].

Os campos da mensagem onde seguem informações relevantes são o Identificador, de 11 bits no exemplo apresentado, e o campo de dados que no máximo poderá ter 8 bytes. Os outros campos são de controlo e detecção de erros.

## Ethernet

A Ethernet, que começou por se chamar Alto Aloha Network, surge na década de setenta por Bob Metcalfe no Xerox PARC, Califórnia. A Ethernet teve como base de desenvolvimento um outro sistema de comunicações, o Aloha, desenvolvido na Universidade do Hawaii no final da década de sessenta [SPURGEON, 2000].

O sistema de comunicações Aloha era bastante simples. Bob Metcalf propôs-se a melhorar este sistema e para isso desenvolveu um mecanismo de detecção e colisão com

múltiplo acesso que ficou conhecido por CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). Este mecanismo permitiu criar uma rede de comunicações com mais de dois intervenientes sem que haja perda de informação derivado a conflitos no acesso ao meio de transmissão. Sempre que é detectada uma colisão de mensagens, os intervenientes aguardam um tempo aleatório até tentarem um novo envio, este processo é repetido até que a mensagem seja entregue com sucesso ou até expirar o número máximo de tentativas permitido [SPURGEON, 2000].

Actualmente existem vários tipos de Ethernet. A diferença entre eles reside na velocidade de transmissão de dados e no meio físico de transmissão. Quanto à velocidade máxima de transmissão de dados podem ser distinguidos quatro tipos, são eles:

- Standard Ethernet (10 Mbit/s).
- Fast Ethernet (100Mbit/s).
- Gigabit Ethernet (1Gbit/s).
- 10 Gigabit Ethernet (10 Gbit/s).

Quanto ao meio de transmissão de dados existem quatro possibilidades, são elas:

- Cabo coaxial
- Par entrançado
- Fibra óptica
- *Wireless* (sem fios)

A estrutura básica de uma mensagem Ethernet é definida pelo padrão IEEE 802.3. Cada mensagem é composta por vários campos e o seu tamanho máximo está limitado aos 1525 *bytes*. A Tabela 3.1 mostra a composição de uma mensagem Ethernet [KASIM, 2008].

Tabela 3.1: *Mensagem Ethernet definida pelo padrão IEEE 802.3.*

<b>7</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>46-1500</b>	<b>4</b>	<b>bytes</b>
Preamble	SOF	DA	SA	Length/Type	Data	FCS	

Os campos da mensagem onde seguem informações relevantes são o DA (endereço de destino), o SA (endereço de origem) e o campo de dados que poderá ter até 1500 bytes. Os outros campos são de controlo e detecção de erros.

## Bluetooth

O Bluetooth é uma tecnologia de comunicações sem fios de curto alcance que foi desenvolvido para permitir a troca de dados entre dispositivos, como por exemplo telemóveis ou mesmo entre um computador e diversos periféricos.

Esta tecnologia começou a ser desenvolvida em 1994 pela empresa Ericsson. Mais tarde, em 1998, outras empresas juntaram-se à Ericsson e formaram um consórcio denominado SIG (*Bluetooth Special Interest Group*) com o objectivo de desenvolver o Bluetooth [INFOWESTER, 2010].

As comunicações Bluetooth utilizam a gama frequências ISM (*Industrial Scientific and Medical*), em particular a faixa dos 2,45 GHz. Esta gama de frequências, por não necessitar de licença, é utilizada por outros protocolos o que pode originar interferências na comunicação. Para contornar este problema o Bluetooth implementa o mecanismo FH-CDMA (*Frequency Hopping – Code Division Multiple Access*). Este mecanismo faz com que a frequência seja dividida em vários canais. Quando um dispositivo está a comunicar troca de canal de uma forma muito rápida o que reduz a largura de banda e minimiza as hipóteses de ocorrer uma interferência [INFOWESTER, 2010].

Uma rede de dispositivos Bluetooth é denominada por Piconet. Em cada Piconet podem estar envolvidos até oito dispositivos, sendo que o que inicia a comunicação assume o papel de *master* e os restantes são *slaves*. Um *slave* pode participar em duas Piconet em simultâneo o que permite expandir a rede de dispositivos (ver Figura 3.3). A uma rede formada por duas ou mais Piconet dá-se o nome de Scatternet.

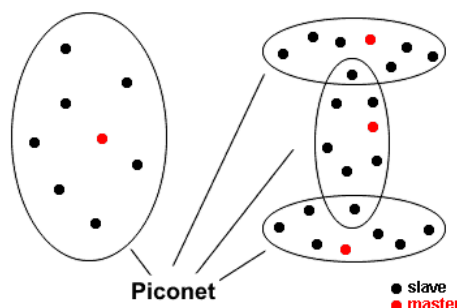


Figura 3.3: Rede de dispositivos Bluetooth [INFOWESTER, 2010].

Os dispositivos baseados na tecnologia Bluetooth estão divididos em três classes de acordo com o alcance máximo, são elas:

- **Classe 1:** até 100m (100 mW).
- **Classe 2:** até 10m (2,5 mW).
- **Classe 3:** até 1m (1 mW).

Desde que foi criado o Bluetooth tem sofrido algumas modificações. As primeiras modificações procuraram melhorar questões relacionadas com problemas de segurança e de interoperabilidade entre dispositivos. As modificações mais recentes procuraram aumentar a velocidade de transmissão de dados e reduzir o consumo de energia dos equipamentos.

A versão mais recente do Bluetooth é a 4.0, em que a novidade face às versões anteriores é o baixo consumo dos equipamentos. Nesta versão a velocidade de transmissão padrão é 1Mbit/s. Equipamentos de versões mais avançadas podem comunicar com dispositivos de versões anteriores, no entanto a velocidade de transmissão máxima é definida pelo dispositivo da versão anterior.

## PLC

A tecnologia PLC tem actualmente várias aplicações desde fornecimento de serviços como Internet e televisão passando por sistemas de automação residencial, como o X10 ou LonWorks, ou outros sistemas SCADA. Esta tecnologia não é recente, em 1920 era já utilizada pelas companhias fornecedoras de electricidade em aplicações de telemetria [INIEWSKI, 2010] [YOUSULF, 2007].

Esta tecnologia utiliza a rede eléctrica como meio de transmissão de dados quer seja a rede de alta, média ou baixa tensão. Este facto é apresentado como uma das vantagens desta tecnologia, sendo que teoricamente os custos de instalação de uma rede de comunicações estão apenas confinados aos *modem* [INIEWSKI, 2010]. A Figura 3.4 mostra o exemplo de uma rede doméstica.

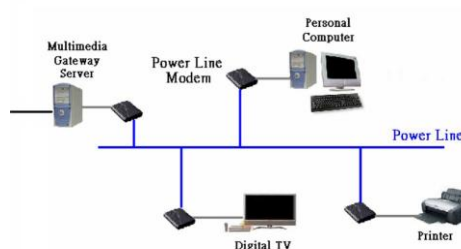


Figura 3.4: Exemplo de rede PLC.

As velocidades de transmissão dependem do protocolo utilizado. Por exemplo, o protocolo X10 permite taxas de transferência de 50 bit/s em redes eléctricas em que a frequência é 50 Hz no entanto com a tecnologia PLC é possível atingir velocidades superiores a 100 Mbit/s. Um dos problemas apontados ao PLC é a sua vulnerabilidade ao ruído induzido por alguns equipamentos eléctricos tais como motores de escovas, lâmpadas fluorescentes ou *dimmers* [YOUSULF, 2007].

## ZigBee

O ZigBee é uma tecnologia de comunicações sem fios baseada no padrão IEEE 802.15.4 e foi pensado para redes de sensores em que as comunicações são de curto alcance e com baixas taxas de transferência de dados.

Os dispositivos baseados no ZigBee são de muito baixo consumo de energia, o que acaba por ser uma solução interessante em aplicações nas quais os sensores ou outros dispositivos são alimentados por uma bateria. Em aplicações típicas de redes de sensores a duração das baterias pode ir desde meses até anos antes de serem substituídas [GISLASON, 2008].

O ZigBee opera em três faixas distintas da gama de frequências ISM, são elas 868 MHz na Europa, 915 MHz na América e 2,4 GHz global. Em cada faixa existem respectivamente 1, 10 e 16 canais e velocidade máxima de transmissão de dados é 250 kbit/s na faixa dos 2,4 GHz [GISLASON, 2008].

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee suportam várias topologias de rede tais como malha (*mesh*), árvore (*cluster tree*) ou estrela (*star*), entre outras. Uma rede ZigBee suporta até 65536 dispositivos e podem ser encontrados dispositivos de dois tipos, os FFD (*Full Function Devices*) e os RFD (*Reduced Function Devices*). A Figura 3.5 mostra exemplos de redes ZigBee com os diferentes tipos de dispositivos.

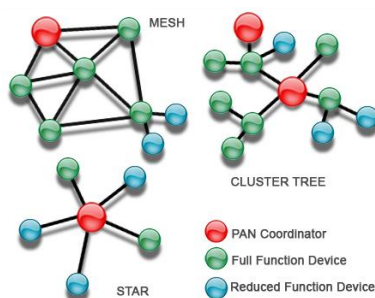


Figura 3.5: Topologias de rede ZigBee.



Quando inserido numa rede ZigBee um dispositivo pode assumir uma de três funções são elas, coordenador, retransmissor ou dispositivo terminal. Um FFD por se tratar de um dispositivo mais complexo pode executar qualquer uma das funções apresentadas, por outro lado um RFD apenas poderá ser um dispositivo terminal.

O coordenador (*PAN coordinator*) é o dispositivo que controla a rede. Este troca informações com os dispositivos terminais e também é responsável por comunicar com o exterior da rede, por exemplo um computador ou mesmo outra rede de dispositivos ZigBee.

Quando a distância entre o coordenador e os dispositivos terminais é demasiado extensa ou no caso de existirem barreiras físicas entre eles e que afectem a comunicação são utilizados retransmissores (*routers*), representado a cor verde na Figura 3.5, que tal como o coordenador é um FFD. A função deste dispositivo é retransmitir a informação enviada pelo coordenador na direcção dos dispositivos terminais ou vice-versa.

Um dispositivo terminal, representado a azul na Figura 3.5, é um RFD cuja função é recolher os dados dos sensores e enviar para o coordenador e também controlar alguns actuadores. Um dispositivo terminal não comunica com outro dispositivo do mesmo tipo, apenas consegue comunicar com dispositivos FFD quer sejam coordenador ou retransmissor. Por se tratar de um dispositivo com funcionalidades reduzidas é, normalmente, mais barato que os FFD [GISLASON, 2008].

Para gerir o acesso ao meio de transmissão o ZigBee faz uso do CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Quando um dispositivo pretende enviar informação começa por verificar se o canal está livre ou não. Essa verificação é feita com base numa medição da energia espectral do canal em questão ou na detecção do tipo de ocupação do canal. Após a verificação se o canal estiver livre o dispositivo inicia a transmissão caso contrário aguarda um tempo aleatório antes de tentar uma nova verificação.

As mensagens trocadas entre dispositivos seguem uma determinada estrutura. Um dos campos dessa estrutura é o FCS (*Frame Check Sequence*). O valor deste campo é calculado pelo dispositivo que envia a mensagem com base no conteúdo da mensagem, quando a mensagem chega ao destino este valor é calculado novamente e deverá que coincidir com o valor que se encontra na mensagem, caso contrário significa que ocorreu um erro na transmissão da mensagem [GISLASON, 2008].

## GSM/GPRS

O GSM é actualmente a tecnologia de comunicações móveis mais utilizada. Esta tecnologia foi desenvolvida na década de oitenta pelo *Groupe Spécial Mobile* no entanto a primeira aplicação comercial surge na década de noventa. O GSM permite efectuar chamadas de voz e trocar mensagens de texto (SMS) ou multimédia (MMS) de baixo volume de dados [KIOSKEA, 2009].

Inicialmente o GSM operava em duas faixas de frequências da gama dos 900 MHz. A faixa dos 890 a 915 MHz destinava-se à transmissão de dados do equipamento móvel para a estação base, a faixa dos 935 a 960 MHz destinava-se à transmissão de dados em sentido contrário. Mais tarde foram disponibilizadas para uso do GSM a gama dos 1800 MHz na Europa e dos 1900 MHz na América e por fim a gama dos 450 MHz [FERNANDES, 2006]. A taxa máxima de transferência de dados prevista pelo GSM ronda os 9600 bit/s.

A Figura 3.6 mostra alguns dos intervenientes de uma rede GSM. O MSC (Mobile Switching Center) é gerido pelo operador de telecomunicações. Este equipamento é responsável por estabelecer as comunicações entre utilizadores, gerir a sua identidade, localização e também ligar a rede GSM à rede fixa e à Internet. A ligação à Internet tem como objectivo armazenar dados relativos aos utilizadores em bases de dados.

O BSC (*Base Station Controller*) para além de comunicar com o MSC é responsável gerir a distribuição de recursos pelas várias BTS (*Base Transceiver Stations*). Um equipamento móvel, por exemplo um telemóvel, comunica directamente com a BTS. Cada equipamento móvel contém um cartão SIM (*Subscriber Identity Module*) que identifica o utilizador na rede GSM.

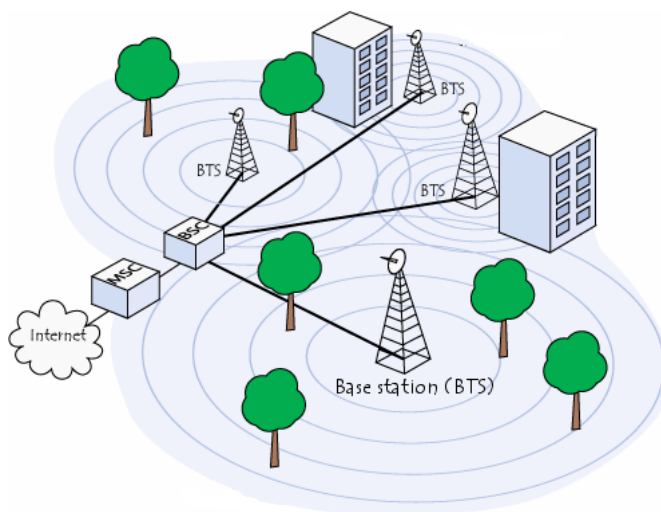


Figura 3.6: Arquitectura da rede GSM.

O GPRS pode ser entendido como um melhoramento do GSM. Com a tecnologia GPRS os dados são transferidos por pacotes o que permite aumentar a taxa de transferência face ao GSM. O valor máximo teórico ronda os 170kbit/s mas na prática é um valor mais baixo, cerca de 115 kbit/s. Outra vantagem é o facto de ser possível facturar em função do volume de dados trocado e não por tempo de ligação.

Para ser possível uma comunicação de dados através de GPRS é necessário adicionar dois equipamentos a uma rede GSM existente, apresentada na Figura 3.6. São eles o SGSN (*Serving GPRS Support Node*) que tem como principais funções gerir a localização dos equipamentos móveis e servir de interface entre equipamento móvel e o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). O GGSN tem como principais funções atribuir um endereço de IP (Internet Protocol) ao equipamento móvel durante a ligação à rede e também servir de interface com a rede externa de dados (Internet) [KIOSKEA, 2009]. A tecnologia GPRS torna possível que um equipamento móvel acesse à Internet através do protocolo de internet (IP) ou X25.

## 3.2 Microcontroladores

Um micro-controlador, por vezes denominado por MCU ou  $\mu C$ , é um circuito integrado que contém no mínimo um microprocessador, memória de dados e de programa e portas de entrada e saída. Inicialmente os micro-controladores foram concebidos para libertar os CPU dos computadores de tarefas relacionadas com a gestão de dispositivos periféricos. Actualmente são utilizados nas mais diversas aplicações desde brinquedos, câmaras digitais, electrodomésticos, automóveis, entre muitas outras [IBRAHIM, 2010].

Para além de memória de dados/programa e portas de entrada/saída um micro-controlador pode integrar outros elementos tais como,

- Portas de comunicação (USART, SPI, I2C, USB, entre outras.)
- ADC (*Analogic to Digital Converter*)
- Controladores de PWM
- Temporizadores
- Memória EEPROM
- Gerador de PWM

Existem vários tipos de micro-controladores com diferentes arquitecturas, funcionalidades e capacidades de processamento. Os mais divulgados são os da família PIC,

fabricados pela Microchip Technology. Estes micro-controladores possuem arquitectura Harvard que se diferencia da arquitectura Princeton por ter duas memórias independentes para dados e para programa, tal como mostra a Figura 3.7.

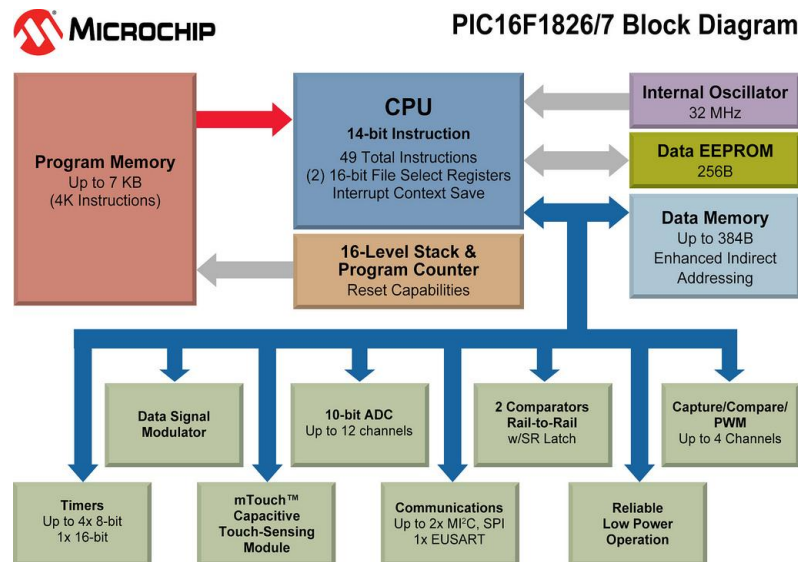


Figura 3.7: Diagrama de blocos PIC.

Os PIC possuem núcleos de processamento de 8, 16 ou 32bits, e estão disponíveis em diferentes tipos de encapsulamento desde 6 a 100 pinos. A programação dos PIC pode ser feita com recurso a linguagens de baixo nível como é o caso do Assembler ou em alternativa linguagens de alto nível como por exemplo C, Basic ou Pascal [IBRAHIM, 2010]. A Microchip disponibiliza um *software* de desenvolvimento com compilador de Assembler integrado, o MPLAB, no qual é possível desenvolver o programa do PIC. Para transferir o programa para o PIC é necessário um módulo de *hardware* adicional, por exemplo o ICD3 ou PICKit3 comercializados pela Microchip [MICROCHIP, 2010].

### 3.3 Transdutores

Um transdutor é um dispositivo que converte uma determinada grandeza numa outra grandeza passível de ser interpretada ou medida por um dispositivo de medição. Por exemplo um termómetro de mercúrio é um transdutor de temperatura que converte uma diferença de temperatura numa diferença de altura (ou volume) passível de ser interpretado numa escala numerada. Um termistor ou um termopar são outros exemplos de transdutores de

temperatura, no entanto estes convertem uma diferença de temperatura numa diferença de tensão.

Os transdutores podem ser classificados de várias formas. Quanto à necessidade de alimentação podem ser classificados como activos ou passivos. Um transdutor activo é aquele que necessita de alimentação para apresentar um valor à saída. O passivo utiliza uma parte da energia de entrada para o seu funcionamento. Quanto ao tipo de indicação podem ser classificados como de indicação directa ou indirecta. Nos transdutores de indicação directa a grandeza pode ser lida directamente no transdutor, por exemplo um termómetro de mercúrio, nos de indicação indirecta o valor fornecido pelo transdutor terá ainda que ser convertido para que possa ser lido, por exemplo o termistor fornece um sinal eléctrico que terá que ser convertido num valor de temperatura seguindo uma determinada equação matemática [BAKSHI, 2007].

Se seguida são apresentados exemplos de transdutores de corrente e tensão.



Figura 3.8: (a) Transdutor de corrente por efeito de Hall; (b) Resistência de shunt.

A Figura 3.8 (a) mostra o exemplo de um transdutor de corrente por efeito de Hall do fabricante Lem. Este transdutor fornece à saída um sinal de tensão directamente proporcional à corrente que o atravessa. A Figura 3.8 (b) mostra o exemplo de um transdutor de corrente passivo. Este transdutor é colocado em série a linha de tensão. A diferença de potencial nos terminais da resistência é directamente proporcional à corrente que a atravessa. O valor deste tipo de resistências é muito baixo, normalmente na casa dos  $200\ \mu\Omega$ .



Figura 3.9: Transdutor de tensão por efeito de Hall.

A Figura 3.9 mostra o exemplo de um transdutor de tensão por efeito de Hall do fabricante Lem. Este é colocado em paralelo com o circuito que se pretende medir. Para evitar que a corrente que atravessa o transdutor seja demasiado elevada deve ser colocada uma resistência em série com o primário. O valor da resistência depende dos níveis de tensão do circuito a medir. O transdutor fornece à saída um sinal eléctrico cujo valor é directamente proporcional à tensão que se pretende medir. Em alternativa a esta solução pode simplesmente ser utilizado um divisor resistivo que naturalmente fornece à saída um sinal directamente proporcional ao sinal de entrada. Quando se dimensiona o divisor resistivo deve ter-se em atenção os níveis de tensão envolvidos, quer à entrada quer à saída, bem como as potências que cada resistência terá que suportar.

Os transdutores de efeito de Hall apesar de serem soluções mais dispendiosas oferecem logo à partida isolamento da rede eléctrica. Por outro lado a resistência de *shunt* e o divisor resistivo apesar de serem soluções mais baratas não oferecem qualquer protecção. O isolamento do circuito é necessário na maior parte dos casos, e poderá ser feito com transformadores de isolamento à entrada da ADC no caso de se tratar de um sinal sinusoidal, ou com opto-acopladores à saída da ADC.

### **3.4 Analisadores de energia**

Um analisador de energia é um dispositivo que permite medir vários parâmetros da rede eléctrica tais como Tensão, Corrente, Potência (Activa, Aparente e Reactiva), Factor de Potência e Frequência.

Existem diversos circuitos integrados que permitem medir alguns ou mesmo todos os parâmetros acima referidos. Estes dispositivos recebem dois sinais analógicos correspondentes à Tensão e Corrente e são convertidos para sinais digitais pelas ADC internas. Depois de processado o resultado da conversão das ADC, os dados são disponibilizados através de uma porta de comunicações que na maior parte dos dispositivos se trata de uma porta série SPI. Em alguns dispositivos a energia consumida é apresentada na forma de “pulsos de energia” em que cada pulso corresponde uma quantidade fixa de energia [MCP3909, 2009]. A Figura 3.10 é apresentada a arquitectura interna do analisador de energia MCP3909 da Microchip.

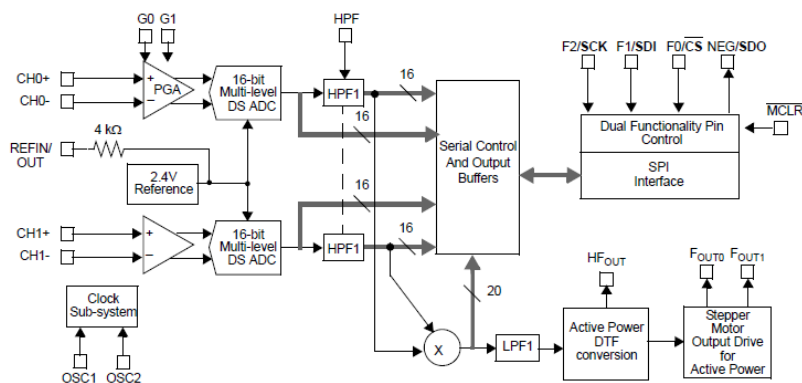


Figura 3.10: Diagrama de blocos do analisador de energia MCP3909 da Microchip.

### 3.5 Técnicas de regulação de fluxo luminoso

#### Pulse Width Modulation

A técnica de modulação por largura de pulso (PWM) tem várias aplicações desde controlo de potência, inversores DC/AC, comunicações digitais entre outras. Existem vários tipos de PWM, nesta secção será apresentado o tipo mais simples.

O sinal de PWM resulta da comutação entre dois níveis de tensão. Este processo é gerido por um dispositivo controlador que poderá ser um micro-controlador ou um dispositivo específico para controlo de PWM. A comutação entre níveis de tensão origina pulsos cuja frequência e largura são definidos pelos dispositivos acima referidos.

Em grande parte das aplicações a frequência do sinal PWM é na ordem dos kHz e mantém-se fixa num determinado valor. A largura de pulso ou “*duty-cycle*” define a percentagem do tempo em que o sinal está no nível alto de tensão, pode variar entre 0 e 100%. Para uma frequência fixa, quanto menor for a largura de pulso menor é a tensão eficaz aplicada à carga e consequentemente menor é a potência fornecida [BARR, 2001]. A Figura 3.11 mostra o exemplo de três sinais PWM com a mesma frequência e larguras de pulso diferentes.

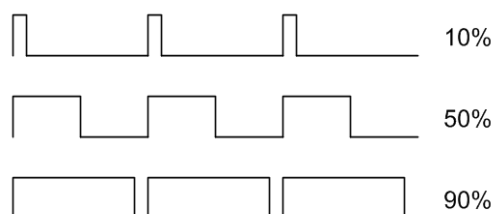


Figura 3.11: Modulação por largura de pulso.

Este tipo de PWM, com um circuito de potência adequado, pode ser aplicado directamente no controlo de equipamentos alimentados a corrente contínua, por exemplo lâmpadas que utilizam a tecnologia LED.

### Controlo do ângulo de disparo

Esta é uma técnica aplicada no controlo de potência fornecida a diversos equipamentos alimentados a corrente alternada. A nível de controlo de iluminação esta técnica só pode ser utilizada em lâmpadas do tipo incandescente ou halógeno uma vez que a forma da onda é alterada [SANTIAGO, 2006].

O ângulo de disparo ( $\theta$ ) varia entre 0 e 90° o que em termos temporais corresponde a 0 e 10 mili-segundo numa rede eléctrica a 50 Hz. Para controlar do ângulo de disparo são necessários três elementos, detector de passagem por zero, Triac e controlador.

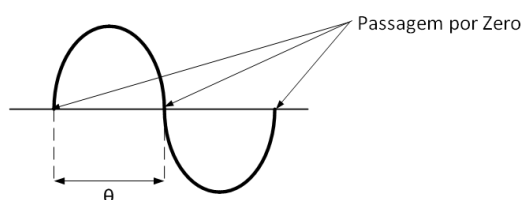


Figura 3.12: Ângulo de disparo.

O Triac trata-se de um componente electrónico que permite a condução de corrente em dois sentidos e tem a particularidade de deixar de conduzir quando a tensão atravessa o zero. Nessa altura para que retome a condução é necessário aplicar um pulso de tensão num dos seus pinos (*Gate*), o chamado "disparo". O ângulo de disparo é controlado indirectamente, na prática é controlado o tempo que decorre entre a passagem por zero e o momento em que se aplica o pulso de tensão na *Gate* do Triac.

Este controlo pode ser feito com um circuito analógico baseado no ajuste do tempo de carregamento de um condensador através de um potenciómetro. Em alternativa pode ser utilizado um micro-controlador e um detector de passagem por zero (*Zero-Crossing*). O objectivo do detector passa por gerar um pulso ou uma transição entre dois níveis de tensão sempre que a onda atravessa o zero, o que provoca uma interrupção no micro-controlador. A função do micro-controlador é gerir o tempo que decorre desde que detectou a passagem por zero até aplicar um pulso na *Gate* do Triac.

Segundo [SANTIAGO, 2006] com esta técnica de controlo a relação entre a tensão eficaz de entrada ( $V_i$ ) e a tensão eficaz aplicada à carga ( $V_o$ ) pode ser traduzida pela equação 2.



$$V_0 = V_i * \cos(\theta) \quad (2)$$

### Auto-transformador variável

Esta técnica utiliza um transformador especial denominado por auto-transformador variável ou vulgarmente por Variac. Este transformador é constituído por um único enrolamento em torno de um núcleo de ferro toroidal partilhado por um “primário” com um número de espiras fixo e por um “secundário” com um número de espiras variável. É um dispositivo bastante eficiente e pode ser utilizado como redutor ou amplificador de tensão.

A razão de transformação entre o primário e o secundário é alterada fazendo deslizar uma escova de carvão nas espiras do enrolamento. A Figura 3.13 mostra o esquema de funcionamento do auto-transformador. O primário é conectado ao nó 1 e 2 do enrolamento e o secundário é conectado ao nó 1 e ao 3 que está solidário com a escova de carvão. Enquanto a posição da escova (nó 3) se situar entre os nós 1 e 2 o auto transformador funciona como redutor de tensão, quando a posição da escova vai para além do nó 2 funciona como amplificador de tensão.

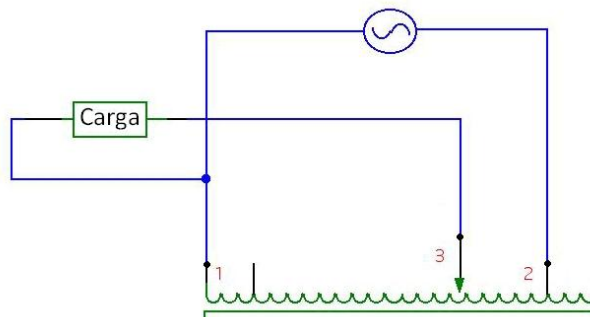


Figura 3.13: Auto-transformador variável.

Uma grande parte dos fabricantes deste tipo de equipamentos opta por um encapsulamento em que a escova de carvão está colocada sobre um eixo rotativo. A razão de transformação pode ser alterada de modo manual fazendo rodar um botão, ou então de uma forma automatizada e para isso é necessário acoplar um servomotor ou motor de passo ao transformador para fazer rodar a escova sobre as espiras. O controlo do motor poderá eventualmente ser feito por um micro-controlador. Para estabilizar a tensão no secundário são utilizadas indutâncias em série (*booster's*).

### Injecção de tensão em oposição de fase

Esta técnica utiliza um transformador, denominado por Injector, que é constituído por um enrolamento primário e um secundário com um ou mais pontos intermédios. Adicionalmente é necessário um sistema de comutação que permita variar a amplitude da contra-tensão (tensão em oposição de fase) injectada na rede. Este sistema poderá eventualmente ser controlo manual no entanto para automatizar o processo de comutação são utilizados relés. Em caso de falha do sistema automático de controlo a tensão à saída mantém-se igual à tensão de entrada. A Figura 3.14 mostra o aspecto de um sistema de injecção de tensão em oposição de fase [ABEL, 2010].

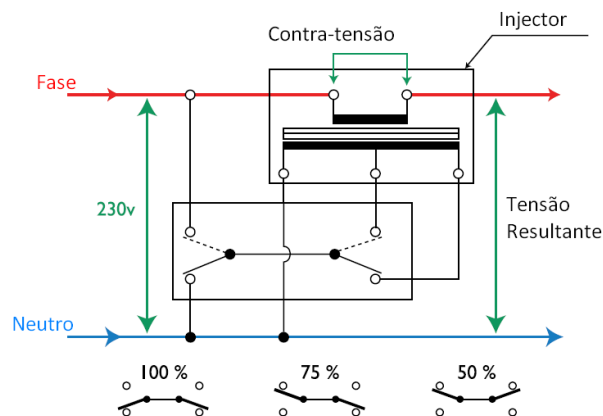


Figura 3.14: Sistema de injeção de tensão em oposição de fase.

A contra-tensão é injectada na rede com um desfasamento de  $180^\circ$  em relação à tensão de entrada. A tensão à saída é tanto menor quanto maior for a amplitude da contra-tensão injectada na rede, como é possível verificar na Figura 3.15. Este processo não provoca distorção harmónica da sinusóide [ABEL, 2010].

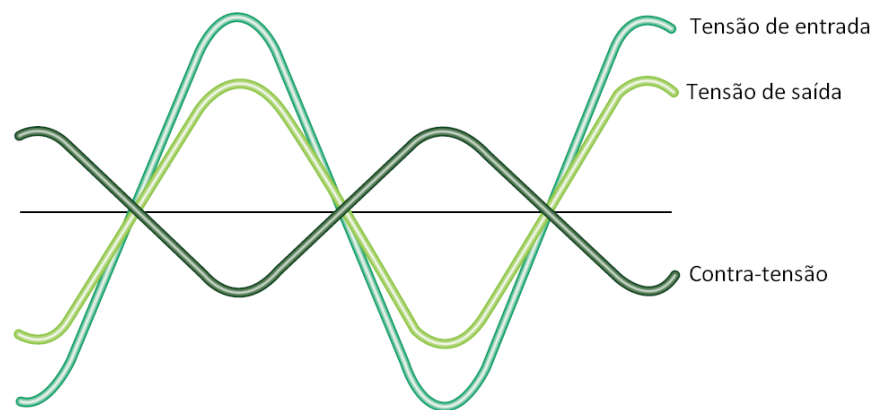


Figura 3.15: Injecção de tensão em oposição de fase.



## Capítulo 4

# Solução Proposta

Neste capítulo é feita uma descrição do protótipo desenvolvido. Em primeiro lugar é apresentada a arquitectura da solução proposta, onde é explicada a interacção entre os vários elementos e a estrutura das mensagens utilizadas. Seguidamente é apresentado o *hardware* desenvolvido, onde são discutidos aspectos relacionados com a escolha dos dispositivos que o compõem e o seu funcionamento. Por fim é apresentado o *software* desenvolvido, onde é feita uma descrição da aplicação local em Visual Basic e do portal Web.

### 4.1 Arquitectura da solução proposta

A arquitectura proposta (Figura 4.1) passa por uma central de comando e supervisão que poderá eventualmente ser instalada num edifício. Na central existe um computador com ligação à internet no qual corre uma aplicação desenvolvida em Visual Basic, e também o *software* Xampp.

Na rede de iluminação pública cada ponto de iluminação possui um módulo de hardware que permite efectuar o controlo do fluxo luminoso, medir os consumos da luminária e potência, bem como detectar a falha da lâmpada.

Para a comunicação entre a central e os pontos de iluminação foi posta de parte a hipótese de utilizar soluções com fios uma vez que implicaria uma alteração estrutural numa rede existente e o comprimento do barramento de dados seria consideravelmente elevado. Por outro lado a maior parte dos fabricantes deste tipo de sistema utiliza o GSM/GPRS e o PLC para comunicação de dados, neste trabalho resolveu-se apresentar uma solução alternativa. Assim sendo optou-se por uma solução sem fios em que a comunicação é feita por radiofrequência e para isso são usados módulos *wireless* XBee, que utilizam a tecnologia ZigBee. As mensagens enviadas pela central são retransmitidas pelos módulos XBee até chegarem ao ponto de iluminação de destino, da mesma forma as mensagens enviadas por um ponto de iluminação são retransmitidas até chegarem a central.

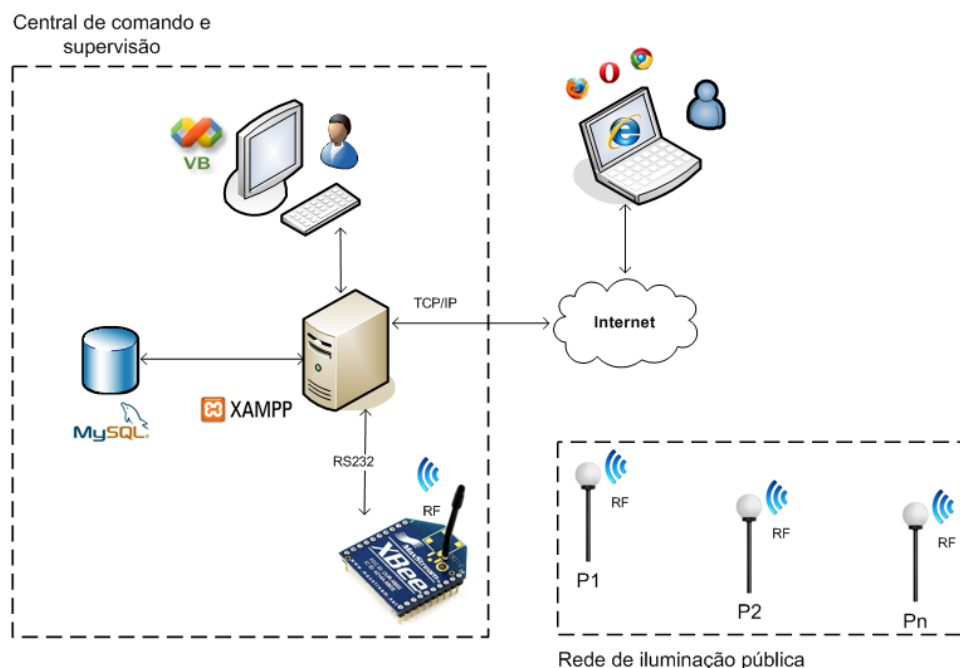


Figura 4.1: Arquitectura da solução proposta.

São propostos dois tipos de mensagens, uma mensagem de comando (Tabela 4.1) que é enviada pela central para os pontos de iluminação e uma mensagem de dados (Tabela 4.2) enviada pelos pontos de iluminação para a central que contém os dados adquiridos bem como o estado da lâmpada. Aproveitando o facto da interface de comunicação com os módulos XBee ser através de RS232 as mensagens são compostas por caracteres ASCII e a detecção de erros é feita com base na identificação de caracteres especiais que iniciam os vários campos.

Tabela 4.1: Mensagem de comando.

Função	ID	Fluxo	EOM	11 byte
0,1	0 - 999	0 - 100	\n	

O primeiro campo da mensagem define o objectivo da mensagem, 0 para alterar o fluxo luminoso e 1 pedir os dados recolhidos por um determinado ponto de iluminação e nesse caso o ponto de iluminação envia uma mensagem com os dados para a central. O campo ID define o endereço de destino da mensagem, se o endereço for 0 significa que a mensagem se destina a todos os pontos de iluminação. Com a estrutura proposta o número máximo de pontos de iluminação da rede está limitado aos 999. O campo Fluxo define a percentagem de fluxo luminoso pretendido. Quando se trata de uma mensagem para pedir dados este campo pode tomar qualquer valor. Por fim o campo EOM define o caractere de fim de mensagem. Por

exemplo, a mensagem “F0P001B075\n” indica ao ponto de iluminação com o endereço 001 que deve alterar o fluxo luminoso para 75% do valor nominal.

Tabela 4.2: *Mensagem de dados.*

ID	kWh	Imp	Potência	Estado	EOM	
1-999	6 byte	6 byte	7 byte	2 byte	\n	25 byte

O campo ID define o endereço de origem da mensagem. No campo kWh encontra-se o número de pacotes de energia consumida (cada pacote corresponde a 1 kWh). No campo Imp encontra-se o número de pulsos acumulados após o registo do último pacote de energia. Cada pulso corresponde a um valor fixo de energia que posteriormente tem que ser convertido para kWh. No campo Potência segue um valor que permite calcular a potência activa que está a ser consumida pela luminária<sup>5</sup>. No campo Estado segue a informação relativa ao estado da lâmpada, 0 caso se encontre operacional ou 1 no caso de se encontrar inoperacional. Por fim o campo EOM define o caractere de fim de mensagem. A mensagem de dados tem o seguinte aspecto, “PxxxExxxxxlxxxxTxxxxxSx\n”.

## 4.2 Hardware

Após a escolha da arquitectura do sistema, apresentada na secção anterior, partiu-se para o desenvolvimento dos módulos de hardware para colocar em cada ponto de iluminação, sempre em foco numa solução robusta e de baixo custo. Nesta fase foi necessário tomar algumas decisões quanto à arquitectura do módulo (Figura 4.2) e à escolha de dispositivos que o compõem.

A escolha dos módulos *wireless* XBee<sup>6</sup> face a outras tecnologias de comunicação sem fio teve como principais factores de decisão o seu baixo custo, longo alcance e baixo consumo de energia e também o facto de possuírem uma interface série RS232.

A escolha do analisador de energia teve como principal factor de decisão a relação entre o custo e as funcionalidades oferecidas. Foram considerados vários dispositivos de três fabricantes, Cirrus Logic, Analog Devices e Microchip, sendo que a escolha recaiu no analisador

<sup>5</sup> Na secção 4.3 é descrito com detalhe a forma como se obtêm os valores mencionados.

<sup>6</sup> No Apêndice A é explicado o funcionamento dos módulos XBee.

MCP3909<sup>7</sup> da Microchip. Na Tabela 4.3 é possível verificar uma comparação entre alguns dos dispositivos considerados. A informação relativa as funcionalidades de cada dispositivo foi obtida no Web site do respectivo fabricante, a informação relativa a preços foi obtida no Web site do distribuidor de material electrónico, Farnell.

Tabela 4.3: Comparação entre vários modelos de analisadores de energia.

IC	Pulso de Energia	SPI	V,I <sub>RMS</sub>	V,I <sub>Inst.</sub>	P <sub>Activa</sub>	P <sub>Aparente</sub>	P <sub>Reactiva</sub>	Preço*
CS5463	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	3.03€
CS5462	✓				✓			**
ADE7753	✓	✓	✓		✓	✓	✓	2.38€
ADE7755	✓				✓			1.78€
MCP3906	✓				✓			1.40€
MCP3909	✓	✓		✓	✓	✓		1.45€

\* encomendas iguais ou superiores a 1000 unidades.

\*\* preço não encontrado.

A escolha do micro-controlador recaiu no PIC16F877A com encapsulamento de 40 pinos. Este possui portas de comunicação série USART e SPI, uma ADC de 10 bits com 8 canais, dois módulos CCP (*Compare/Capture/PWM*), um temporizador de 16 bits e dois de 8 bits, uma EEPROM interna de 256 bytes, memória de dados com 368 bytes e de programa com 14.3 kbytes, entre outras funcionalidades. Inicialmente ponderou-se utilizar uma EEPROM externa para armazenar dados e parâmetros de configuração, inclusivamente chegou a ser estudado o seu funcionamento, no entanto uma análise mais cuidada demonstrou que a memória EEPROM interna do micro-controlador era suficiente para este trabalho. No apêndice B deste documento é descrito o funcionamento da EEPROM estudada.

Neste trabalho foram aplicadas duas técnicas de controlo de fluxo luminoso. Para lâmpadas do tipo incandescente ou de halógeno foi utilizada a técnica de controlo do ângulo de disparo, para lâmpadas do tipo LED foi utilizada a técnica de PWM, sendo que esta última foi apenas simulada com um LED de alto brilho.

Foram seleccionados para este trabalho dois transdutores de efeito de Hall do fabricante Lem. O transdutor de tensão LV 25-P [LV25P] e o de corrente LTS 15-NP [LTS15NP]. A escolha

<sup>7</sup> No Apêndice C é explicado o funcionamento do analisador MCP3909.



destes transdutores teve como principais factores de decisão o facto de oferecerem isolamento galvânico da rede eléctrica e uma excelente linearidade, apesar do seu custo elevado quando comparado com outro tipo de transdutores.

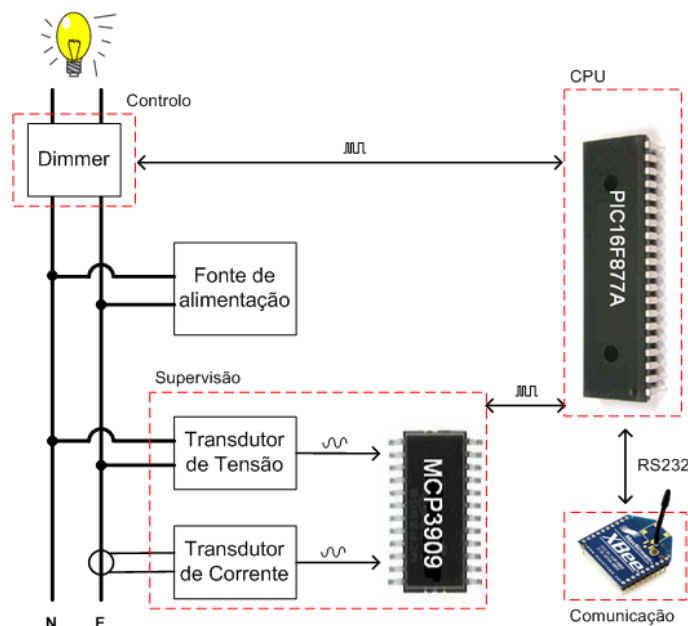


Figura 4.2: Arquitectura do módulo de hardware.

Para que seja na medição dos consumos de energia seja incluído o consumo do próprio módulo é obrigatório respeitar a arquitectura apresentada na Figura 4.2. Seguindo a linha de tensão, em primeiro lugar surge o transdutor de corrente, para que seja medida toda a corrente que atravessa o circuito. Depois, vem o transdutor de tensão e a fonte de alimentação. Por fim surge o equipamento de controlo do fluxo luminoso.

Os transdutores de tensão e corrente fornecem à saída sinais analógicos sinusoidais correspondentes à tensão e corrente, respectivamente. Estes sinais têm que ser condicionados por *hardware* auxiliar para que correspondam às especificações de entrada do analisador de energia.

Neste trabalho não foi utilizada a interface SPI do analisador de energia, a medição dos consumos de energia foi conseguida através do processamento de pulsos de energia fornecidos pelo analisador, sendo possível obter a energia activa e potência activa.

Existem dois tipos de pulso, dois de baixa frequência, o par  $F_{OUT0}$  e  $F_{OUT1}$ , e um de alta frequência, o  $HF_{OUT}$ , e cada pulso corresponde a uma determinada quantidade de energia<sup>8</sup>. Seguidamente são discutidos alguns aspectos relacionados com o desenvolvimento do módulo de hardware apresentado nas Figuras 4.3 e 4.4.

### O módulo de hardware

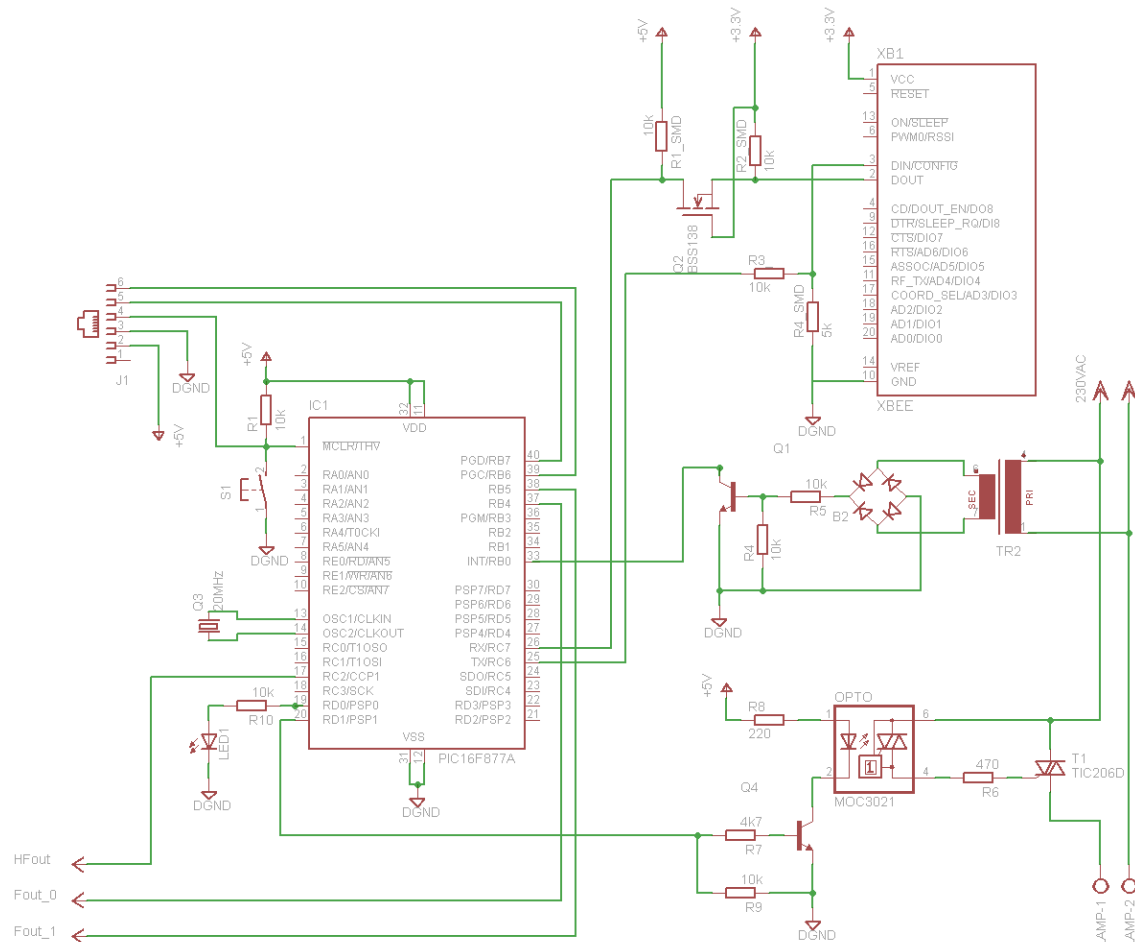


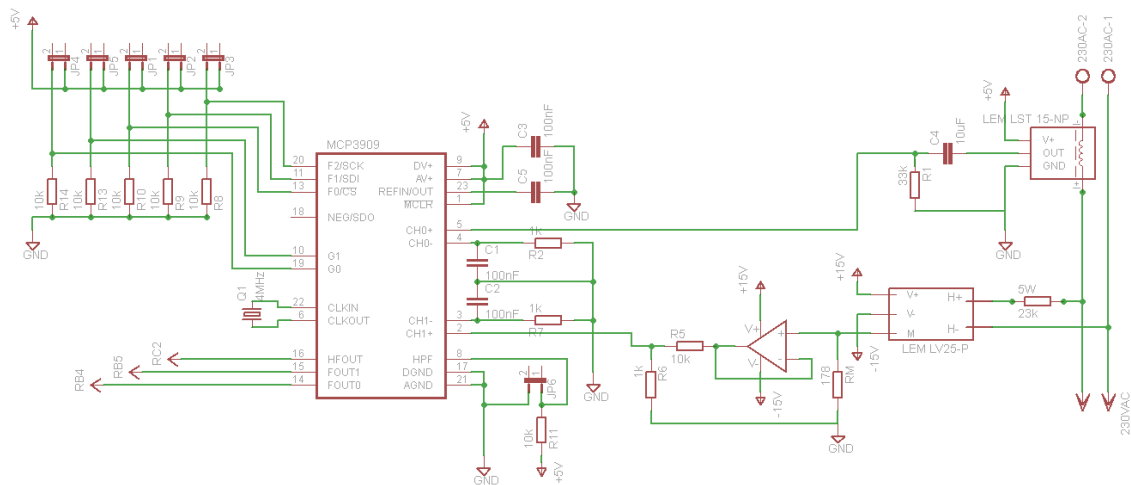
Figura 4.3: Esquema eléctrico do módulo de hardware.

O módulo XBee e o micro-controlador operam a níveis de tensão diferentes, respectivamente 3.3V e 5V, pelo que foi necessário implementar um conversor de níveis de tensão nas linhas de comunicação de dados. A solução adoptada consiste em utilizar um divisor resistivo para baixar o nível de tensão, os valores escolhidos para as resistências foram 5k e 10k, o que para uma tensão de entrada de 5V corresponde a 3.33 V à saída. Para elevar o nível de tensão foi utilizado um MOSFET e duas resistências de *pull-up*, como mostra a Figura 4.3.

<sup>8</sup> Na secção 4.3 é descrito com detalhe a forma como são processados os pulsos de energia.

O detector de passagem por zero consiste num transformador que isola o circuito da rede eléctrica e baixa os níveis de tensão. De seguida o sinal resultante é aplicado na base de um transístor, depois de passar por um divisor resistivo. Neste circuito o transístor comporta-se como um inversor lógico, sempre que o sinal da tensão atravessa o zero este deixa de conduzir corrente e o nível de tensão do colector toma o valor lógico 1, neste caso 5V. O micro-controlador permite activar *pull-up* internos na porta B, pinos RB0 a RB7, pelo que não foi utilizado um *pull-up* externo entre o colector do transístor e os 5V.

O disparo do TRIAC é controlado por uma saída digital do micro-controlador. Para isolar o circuito optou-se por utilizar um opto-acoplador entre a *gate* do TRIAC e a saída digital do micro-controlador.



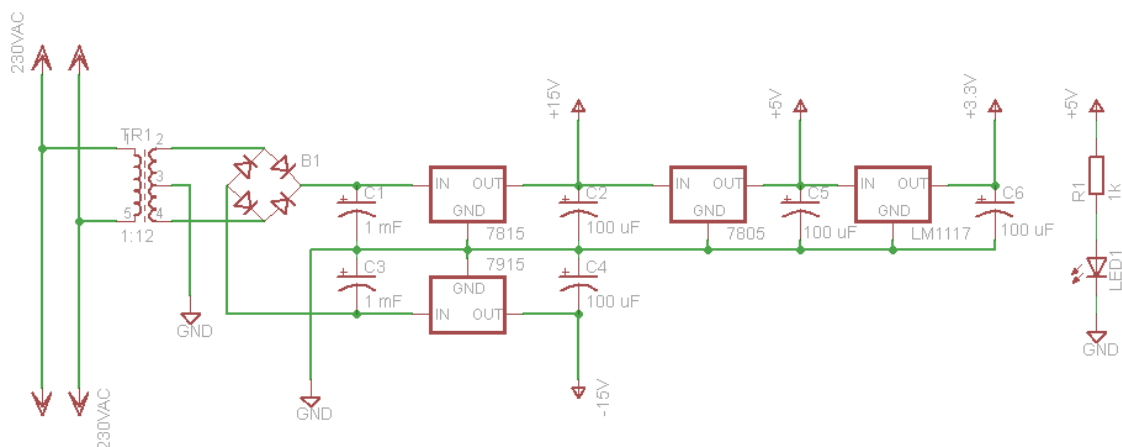
Assim sendo, para uma corrente de  $5A_{RMS}$  o transdutor fornece à saída  $625mV_{RMS}$  com uma componente DC de 2.5V. Apesar do analisador de energia possuir um filtro passa alto decidiu-se implementar um filtro passa alto simples com uma frequência de corte de aproximadamente 0.48 Hz, para tal utilizou-se um condensador de valor  $10\mu F$  e uma resistência de 33k em que a fórmula de calculo utilizada foi  $(2\pi * C * R)^{-1}$ . O nível de tensão máximo permitido no canal de corrente do analisador é  $470mV_{RMS}$  pelo que os  $625mV_{RMS}$  correspondentes a uma corrente de  $5A_{RMS}$  provocam a saturação do canal. Na prática apenas é possível medir valores de corrente até cerca de  $3.5A_{RMS}$ , o que para uma luminária comum é manifestamente suficiente.

O transdutor de tensão Lem LV25-P é conectado em paralelo com a linha de tensão. Segundo o fabricante a corrente nominal no primário deve rondar os  $10mA_{RMS}$ , assim sendo é necessário colocar uma resistência em série com o primário. Com base na tensão da rede e a corrente do primário, o valor teórico da resistência é 23k e deverá dissipar uma potência de 2.3W. No entanto foi escolhida uma resistência de 25k de 5W. Este transdutor é alimentado com +15V e -15V o que levou a construir uma fonte de alimentação mais complexa (ver Figura 4.6).

À saída do transdutor é colocada uma resistência de medida que converte a corrente no secundário em tensão. O fabricante aconselha uma resistência de valor compreendido entre  $100\Omega$  e  $350\Omega$ , sendo que o valor escolhido foi  $180\Omega$ . Com esta resistência o transdutor apresenta à saída um valor de tensão que ronda os  $4.5V_{RMS}$ , valor este que é demasiado elevado para o canal de tensão do analisador de energia, pelo que foi necessário adicionar um divisor resistivo ao circuito com uma razão de redução teórica de 11:1.

Os pinos F0, F1 e F2 permitem configurar a frequência dos pulsos de energia, os pinos G0 e G1 permitem configurar o ganho do canal de corrente e o pino HPF permite ligar ou desligar os filtros passa alto do analisador. Nestes pinos foram adicionados *jumpers* para tornar possível a configuração manual nesta fase de desenvolvimento do protótipo.

Para garantir que todos os dispositivos presentes no módulo de hardware são alimentados correctamente foi desenvolvida uma fonte de alimentação regulada (Figura 4.6) com quatro níveis de tensão, -15V, +15V, +5V e +3.3V.



Depois de estudado o funcionamento dos vários componentes partiu-se para o desenvolvimento do software a implementar no micro-controlador. O código foi desenvolvido em linguagem C recorrendo ao software MPLAB IDE versão 8.10 disponibilizado pela Microchip. O compilador de C utilizado foi o High-Tech C Compiler versão 9.7. A figura 4.7 mostra o diagrama de fluxo do *software* implementado.

O micro-controlador começa por ler alguns parâmetros de configuração da sua EEPROM interna. Seguidamente são configurados os parâmetros da comunicação série RS232, permissão de interrupções, temporizadores e portas de entrada e saída. Por fim, entra num ciclo infinito responsável por duas tarefas, controlar o tempo de disparo do TRIAC e processar as mensagens que chegam por porta série. A gestão das interrupções fica a cargo de uma rotina de serviço à interrupção, esta é responsável por gerir vários tipos de eventos, desde recepção de caracteres na porta série, pulsos aplicados nos pinos do micro-controlador, RB0, RB4/5 e RC2, pulsos estes que correspondem à detecção da passagem por zero, pulsos de energia  $F_{OUT0}$  e  $F_{OUT1}$  e pulso de energia  $HF_{OUT}$ , respectivamente.

Na porta série sempre que chegam caracteres diferentes de “\n” estes são armazenados num *buffer*. Quando chega o caractere “\n” significa que a mensagem está completa e que pode ser processada.

Quando no pino RB0 é detectado um pulso é indicado, através de uma variável auxiliar, que a função responsável por controlar o TRIAC que pode iniciar o processo de controlo. Existem três situações possíveis, caso o valor do fluxo luminoso pretendido seja 100% é aplicada uma tensão constante de 5V à *gate* do TRIAC para que este esteja sempre em condução. Caso o valor do fluxo luminoso seja 0% não é aplicada tensão para que o TRIAC não conduza corrente, nos restantes casos após a detecção da passagem por zero é aguardado um

determinado período de tempo, até 10ms no máximo, e de seguida é aplicado um pulso na *gate* do TRIAC controlando desta forma o ângulo de disparo.

Sempre que nos pinos RB4 e RB5 é detectado algum pulso de energia  $F_{OUT0}$  ou  $F_{OUT1}$  é incrementado um contador de pulsos. Como já foi referido cada pulso corresponde a um valor fixo de energia, sempre que o contador atinge um determinado valor que corresponde a 1kWh de energia, é incrementado e guardado na EEPROM interna o contador de energia acumulada. Após esta operação é reiniciado o contador de pulsos.

O pino RC2 está associado ao módulo de captura do micro-controlador, módulo este que permite registar o tempo decorrido entre dois eventos. Neste caso o evento é o pulso de energia  $HF_{OUT}$ . O tempo registado é depois armazenado numa variável temporária para ser utilizado no cálculo da potência activa.

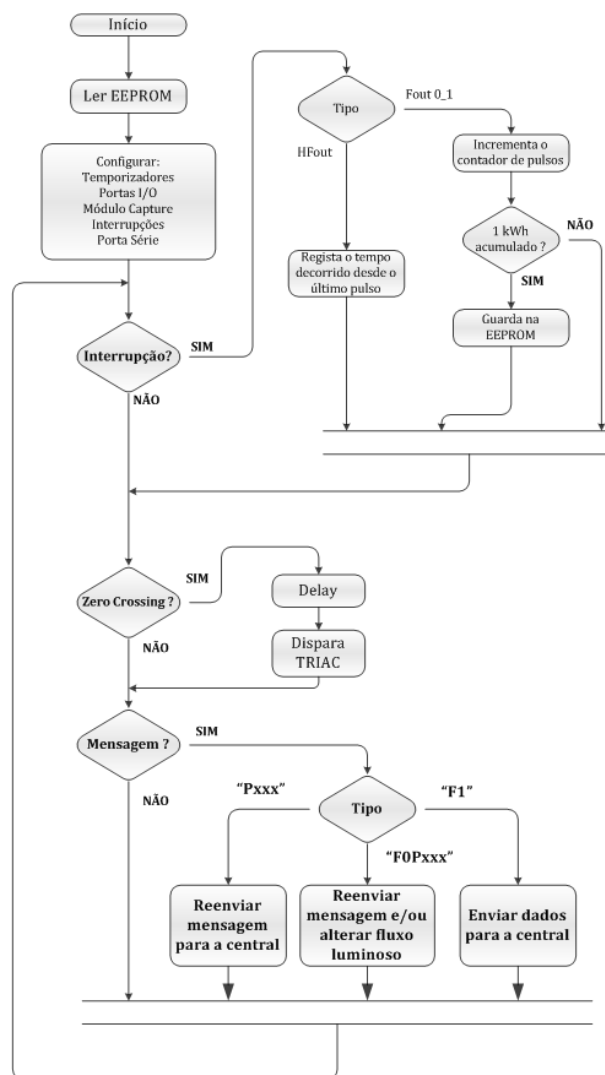


Figura 4.7: Diagrama de fluxo do software.

## O módulo de comunicações da central

O módulo de comunicações (Figura 4.8) é utilizado para conectar o módulo XBee à porta série do computador que está localizado na central. Para converter os níveis de tensão entre o módulo e a porta série, ou eventualmente um adaptador RS232-USB, foi utilizado um MAX232 do fabricante Maxim. A alimentação da placa poderá ser feita através de um cabo USB do tipo A-B ou por uma fonte de alimentação capaz de fornecer no mínimo 3.3V DC.

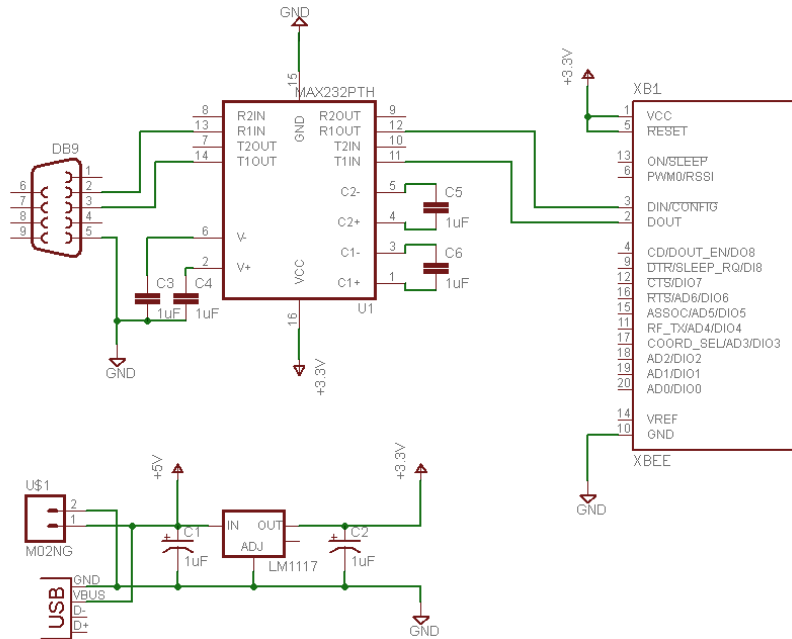


Figura 4.8: Esquema eléctrico da placa de comunicação com o PC.

## 4.3 Cálculos auxiliares

Para ser possível interpretar os pulsos de energia fornecidos pelo analisador de energia é fundamental saber a que quantidade de energia corresponde cada pulso. Esse cálculo é feito com base numa equação matemática [MCP3909, 2009] que relaciona a frequência dos pulsos de energia com o valor de tensão nos canais de corrente e tensão do analisador de energia.

$$F_{OUT} = \frac{8.06 * V_0 * V_1 * G * F_C}{2 * (V_{REF})^2} \quad (3)$$

A equação 3 traduz a frequência dos pulsos de energia  $F_{OUT0}$  e  $F_{OUT1}$  em função dos níveis de tensão RMS aplicados à entrada dos canais de corrente e de tensão ( $V_0$  e  $V_1$ ), da tensão de referência ( $V_{REF}$ ), do ganho do canal de corrente ( $G$ ) e do parâmetro ( $F_C$ ) que depende da

configuração dos pinos  $F_0$  e  $F_1$  e do valor do cristal utilizado no analisador de energia. Neste trabalho foi utilizado um cristal de 4MHz e foi definido que  $F_0 = 1$  e  $F_1 = 1$  o que resulta num valor de  $F_c = 15.258$  Hz, este valor foi obtido através de uma tabela que consta no manual do analisador. Foi utilizada a tensão de referência interna do analisador que corresponde a 2.4V e foi seleccionado um ganho unitário para o canal de corrente. Com estas considerações é apresentada a seguinte expressão,

$$F_{OUT} = \frac{21.3517}{2} * V_0 * V_1 \quad (\text{Hz}) \quad (4)$$

No manual do transdutor de corrente [LTS15NP] consta uma fórmula que relaciona a tensão à saída do transdutor com o valor da corrente que atravessa o circuito,

$$V_0 = 2.5 \pm \frac{0.625 * I_P}{I_{PN}} \quad (\text{V}) \quad (5)$$

A componente de 2.5V (DC) foi removida com um filtro passa alto, tal como foi referido anteriormente. A parcela  $I_{PN}$  representa a corrente nominal (RMS) máxima que atravessa o primário do transdutor e foi definido como sendo  $5A_{RMS}$ , por fim a parcela  $I_P$  representa o valor de corrente (RMS) que se pretende medir, com estas considerações é possível deduzir a seguinte expressão,

$$V_0 = 0.125 * I_P \quad (\text{V}) \quad (6)$$

No manual do transdutor de tensão [LV25-P] consta a razão de espiras entre o primário e o secundário que é 2500:1000. Com este valor é possível afirmar que a corrente que atravessa o secundário é 2.5 vezes superior à que atravessa o primário ( $I_s = 2.5 * I_p$ ). Também é mencionado que a corrente que atravessa o primário deve rondar os  $10mA_{RMS}$ , tendo em conta que o valor de tensão a medir ( $V_{RMS}$ ) é em torno dos  $230V_{RMS}$  é necessário colocar uma resistência ( $R_p$ ) em série com o primário para limitar a passagem de corrente. O secundário está ligado à massa por intermédio de uma resistência de medida ( $R_M$ ) que ao ser atravessada pela corrente que circula no secundário origina uma diferença de potencial nos seus terminais. Esta diferença de potencial é directamente proporcional à tensão na rede eléctrica que se pretende medir.



Com esta considerações é possível deduzir a seguinte expressão,

$$V_1 = 2.5 * \frac{V_{RMS} * R_M}{R_P} \quad (V) \quad (7)$$

Para que a corrente que atravessa o primário seja 10mA o valor da resistência  $R_P$  deve ser 23k, o valor da resistência de medida ( $R_M$ ) segundo o fabricante deve estar compreendido entre 100Ω e 350Ω. Nestas condições o nível de tensão à saída do transdutor é demasiado elevado para o canal de tensão do analisador de energia pelo que terá que ser utilizado um divisor resistivo. Decidiu-se utilizar um factor de redução na ordem dos 11:1 e para isso foram utilizadas resistências de 10k e 1k, respectivamente  $R_1$  e  $R_2$  na equação 8,

$$V_1 = \frac{2.5 * V_{RMS} * R_M * R_2}{R_P * (R_1 + R_2)} \quad (V) \quad (8)$$

Substituindo na equação 4 os valores  $V_0$  e  $V_1$  pelos valores calculados nas equações 6 e 8 e tendo em conta o que representa a parcela  $F_{OUT}$  (pulsos/s) chega-se a um valor constante K que representa a quantidade de energia (W.s) por cada pulso  $F_{OUT}$ .

$$\frac{W.s}{pulso} = K; \quad K = \frac{21.3517}{2} * 0.125 * 2.5 * \frac{R_M * R_2}{R_P * (R_1 + R_2)} \quad (9)$$

O valor K tem que ser calculado para cada módulo de *hardware* uma vez que os valores das resistências e os demais componentes utilizados têm erros associados. Esta calibração poderá ser feita com base em valores de tensão e corrente conhecidos.

Depois de determinado o valor da constante K, é necessário calcular o número de pulsos que correspondem a 1kWh de energia consumida, valor este que serve de referência para o micro-controlador, a equação 10 mostra como se efectua o cálculo.

$$\frac{pulsos}{kWh} = K^{-1} * 3600 * 1000 \quad (10)$$

Tal como os pulsos  $F_{OUT0}$  e  $F_{OUT1}$ , o pulso de energia  $HF_{OUT}$  traduz uma quantidade fixa de energia. Este pulso distingue-se dos outros por ter uma maior frequência e que pode ser configurada através do pino F2 do analisador. Para este trabalho foi seleccionada a opção F2 =

1, que resulta numa frequência 16 vezes superior ao pulso  $F_{OUT}$  e por consequência uma quantidade de energia por pulso 16 vezes inferior.

O micro-controlador regista o tempo que decorre entre dois pulsos  $HF_{OUT}$ , e conhecida a quantidade de energia por pulso é possível calcular a potência activa. Para evitar cálculos com ponto flutuante no micro-controlador, este ao invés de enviar o valor da potência para a central, envia o tempo decorrido entre dois pulsos que oportunamente é convertido na aplicação VB.

## 4.4 Software

Para efectuar a supervisão e controlo do protótipo desenvolvido foram criadas duas interfaces de teste, uma aplicação em Visual Basic e um portal Web. A Figura 4.9 mostra a relação entre as várias aplicações de *software* utilizadas neste trabalho.

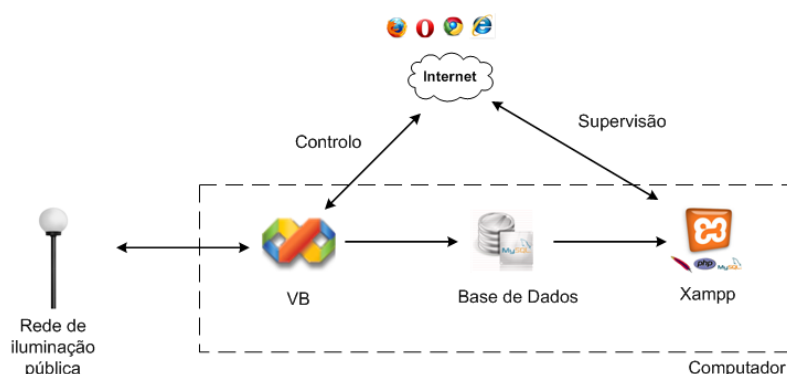


Figura 4.9: Diagrama de interacção entre os vários *softwares*.

A escolha do *software* para este trabalho teve como principal factor de decisão o facto de terem sido testados e validado o seu desempenho em trabalhos anteriores.

O Visual Basic é uma linguagem de programação dirigida por eventos que evoluiu a partir da linguagem de programação Basic, possui um ambiente de desenvolvimento integrado com uma componente gráfica, o que facilita a criação de interfaces das aplicações [MSDN, 2010].

O MySQL é um sistema de gestão de bases de dados, permite gerir bases de dados com um elevado número de registos de uma forma rápida e eficiente para além disso é facilmente integrado com linguagens de programação como é o caso do Visual Basic ou o PHP [MYSQL, 2010].

O Xampp é um pacote de servidores no qual se encontra o servidor Web Apache, o servidor de base de dados MySQL e um interpretador de PHP, entre outros. Esta é uma aplicação bastante útil no desenvolvimento de aplicações Web e não necessita de licença de utilização [XAMPP, 2010].

A Figura 4.10 mostra o funcionamento da aplicação VB. Quando esta é iniciada são feitas algumas configurações, tais como parâmetros da comunicação série RS232, TCP/IP e inicialização de variáveis. De seguida a aplicação monitoriza continuamente a ocorrência de determinados eventos e para cada evento é realizada uma de três acções possíveis.

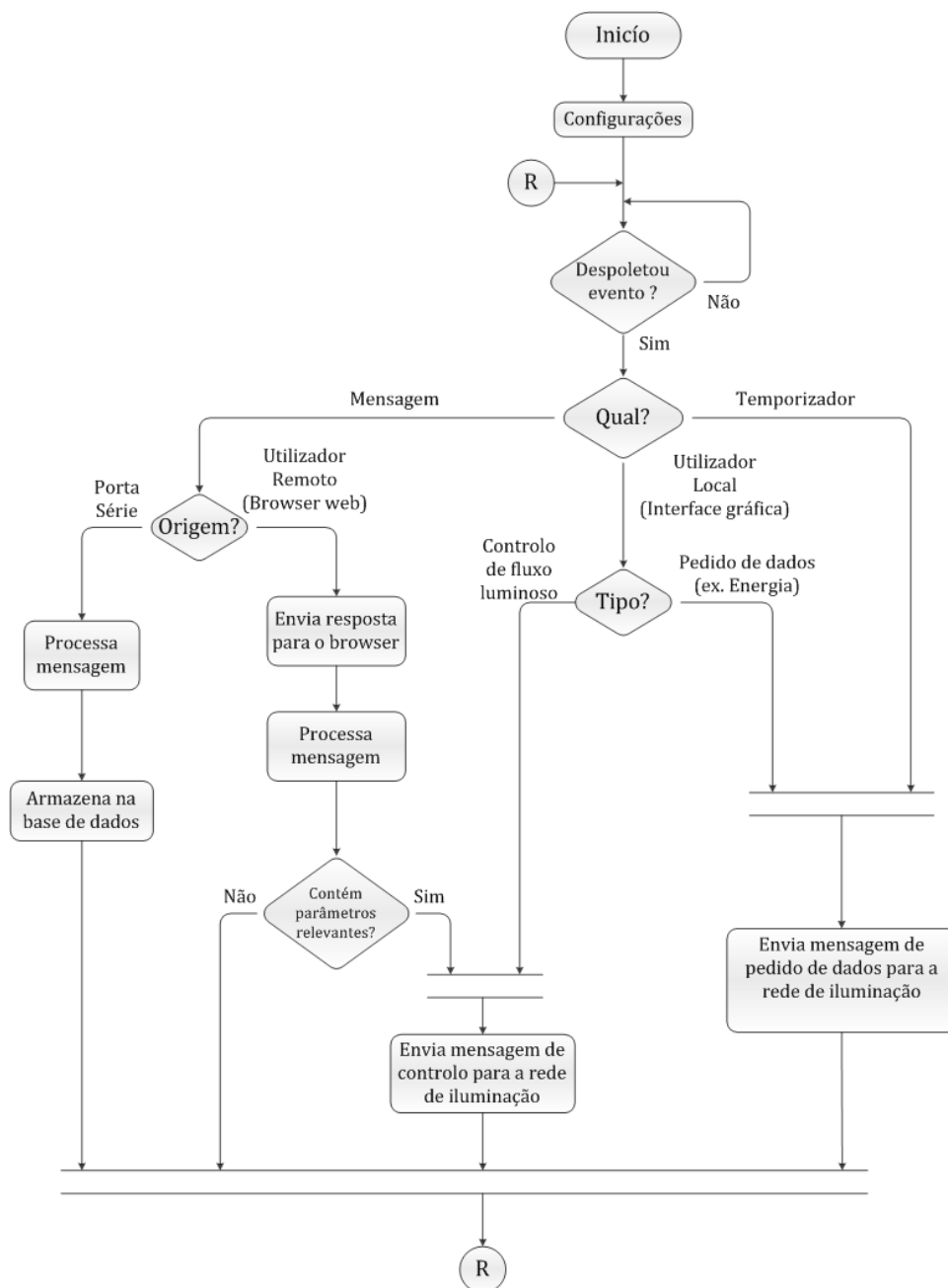


Figura 4.10: Diagrama de fluxo da aplicação VB.

Definiu-se que numa base horária a aplicação VB faz o pedido dos dados recolhidos pelos pontos de iluminação, nessa altura é enviada uma mensagem de pedido de dados para cada ponto de iluminação.

Através da interface gráfica o gestor do sistema tem a possibilidade de enviar mensagens de comando ou de pedido de dados para os pontos de iluminação. É possível seleccionar o endereço para o qual se pretende enviar a mensagem ou eventualmente para todos os pontos da rede e também a percentagem de fluxo luminoso pretendido, no caso de se tratar de uma mensagem de comando.

As mensagens que chegam à aplicação VB podem ter duas origens possíveis, porta série RS232 ou browser Web. À porta série do computador chegam mensagens de dados enviadas pelos pontos de iluminação, nessa altura é feita uma verificação da conformidade da mensagem e em caso de sucesso os dados são processados e armazenados na base de dados. Sempre que um utilizador através browser Web envia uma mensagem para a aplicação VB. Se no conteúdo da mensagem que chegou à aplicação VB constarem parâmetros de controlo do sistema de iluminação tais como endereço de destino ou percentagem do fluxo luminoso, é enviada uma mensagem de controlo para o respectivo ponto de iluminação.

Quando o gestor do sistema acede ao portal é apresentada a página de controlo, desenvolvida em HTML e Javascript. Nesta página o gestor do sistema tem a possibilidade de seleccionar qual ou quais os pontos de iluminação que pretende controlar e também a percentagem de fluxo luminoso. Após a selecção dos parâmetros, está em condições de executar o pedido.

Na página de supervisão do sistema o gestor tem a possibilidade de consultar o histórico de dados armazenados na base de dados. Optou-se por apresentar os dados na forma de gráfico de maneira a facilitar a consulta dos mesmos, para tal foi necessário recorrer às linguagens PHP, HTML e XML. O PHP é uma linguagem de programação que permite criar páginas Web dinâmicas, tem a particularidade do código ser executado no lado do servidor por um interpretador de PHP e para o browser Web segue apenas código HTML [PHP, 2010]. A página PHP encarrega-se de consultar a base de dados e disponibilizar os mesmos para a criação dos gráficos.

São propostos dois tipos de gráfico, um deles desenvolvido em PHP e o outro em Flash/XML, estes são criados de forma automática bastando para isso adicionar um conjunto de ficheiros ao directório do projecto. Para o gráfico em PHP é necessário adicionar um ficheiro disponibilizado gratuitamente pela Source Forge e pode ser descarregado a partir do seu Web site [SOURCEFORGE, 2010], no caso do gráfico em Flash/XML os ficheiros são

disponibilizados pela Maani e podem ser descarregados a partir do seu Web site [MAANI, 2010].



## Capítulo 5

# Implementação e Análise de Desempenho

Neste capítulo é descrita a implementação em laboratório do protótipo desenvolvido. Primeiramente é apresentado o módulo de hardware e de seguida é mostrado o aspecto das interfaces desenvolvidas para a gestão do sistema, a aplicação em VB e o portal Web. Por fim é feita uma análise do desempenho do protótipo, onde é apresentado o custo estimado para cada módulo de *hardware*.

### 5.1 Implementação

A Figura 5.1 mostra os dois pontos de iluminação que foram implementados no Laboratório de Sistemas Flexíveis de Produção. Trata-se de duas lâmpadas de incandescência que são controladas pela técnica de controlo do ângulo de disparo.

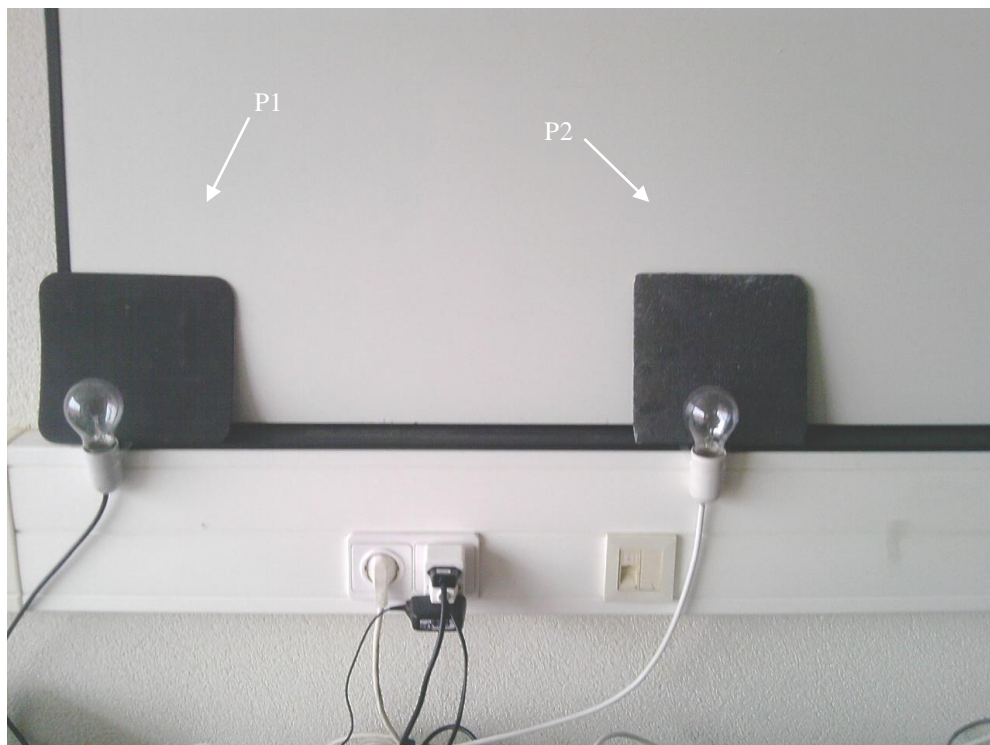


Figura 5.1: Pontos de iluminação implementados no laboratório.

Inicialmente foi testada e implementada com sucesso a técnica de controlo por PWM, para tal foi utilizado um LED de alto brilho controlado pelo módulo PWM embutido no micro-controlador. Uma vez que o consumo de energia do LED era residual em relação ao consumo total do módulo de *hardware* as medições de energia não permitiam tirar conclusões relevantes, assim sendo optou-se por implementar as duas lâmpadas de incandescência.

A Figura 5.2 mostra um dos módulos de *hardware* implementados para o controlo e aquisição de dados de cada ponto de iluminação. Os diversos dispositivos e componentes foram montados em duas placas de teste, nesta fase do protótipo não se justifica o desenvolvimento de placas de circuito impresso (PCB) uma vez que ainda é necessário adicionar alguns sensores e eventualmente alterar dispositivos.

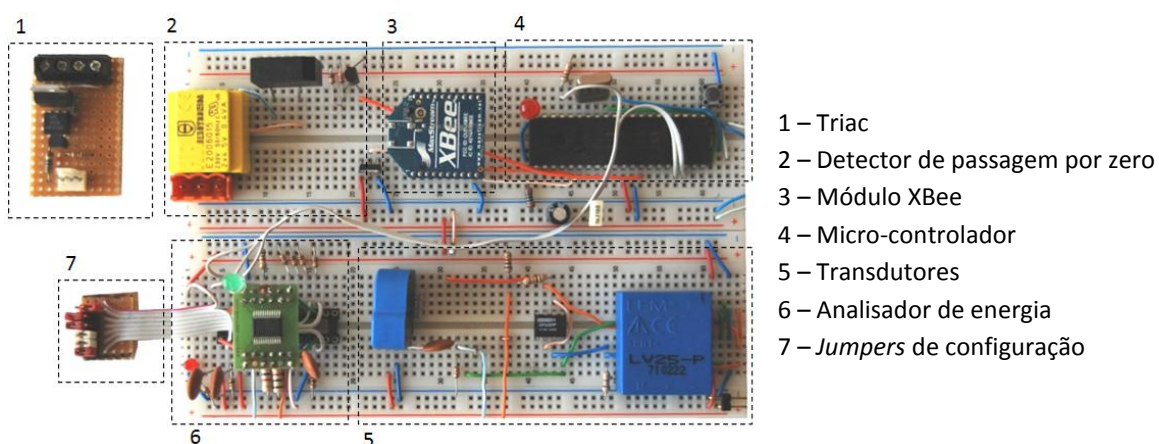


Figura 5.2: Módulo de *hardware*.

Na Figura 5.3 é possível observar o aspecto da interface em VB. Esta é constituída por uma janela principal e uma janela secundária na qual é possível configurar os parâmetros relacionados com a comunicação série RS232.

A janela principal divide-se numa zona de controlo e uma de monitorização dos dados recebidos, além disso é possível visualizar as mensagens trocadas com o browser Web e também com a porta série, o que permite por exemplo identificar a última mensagem enviada ou recebida.



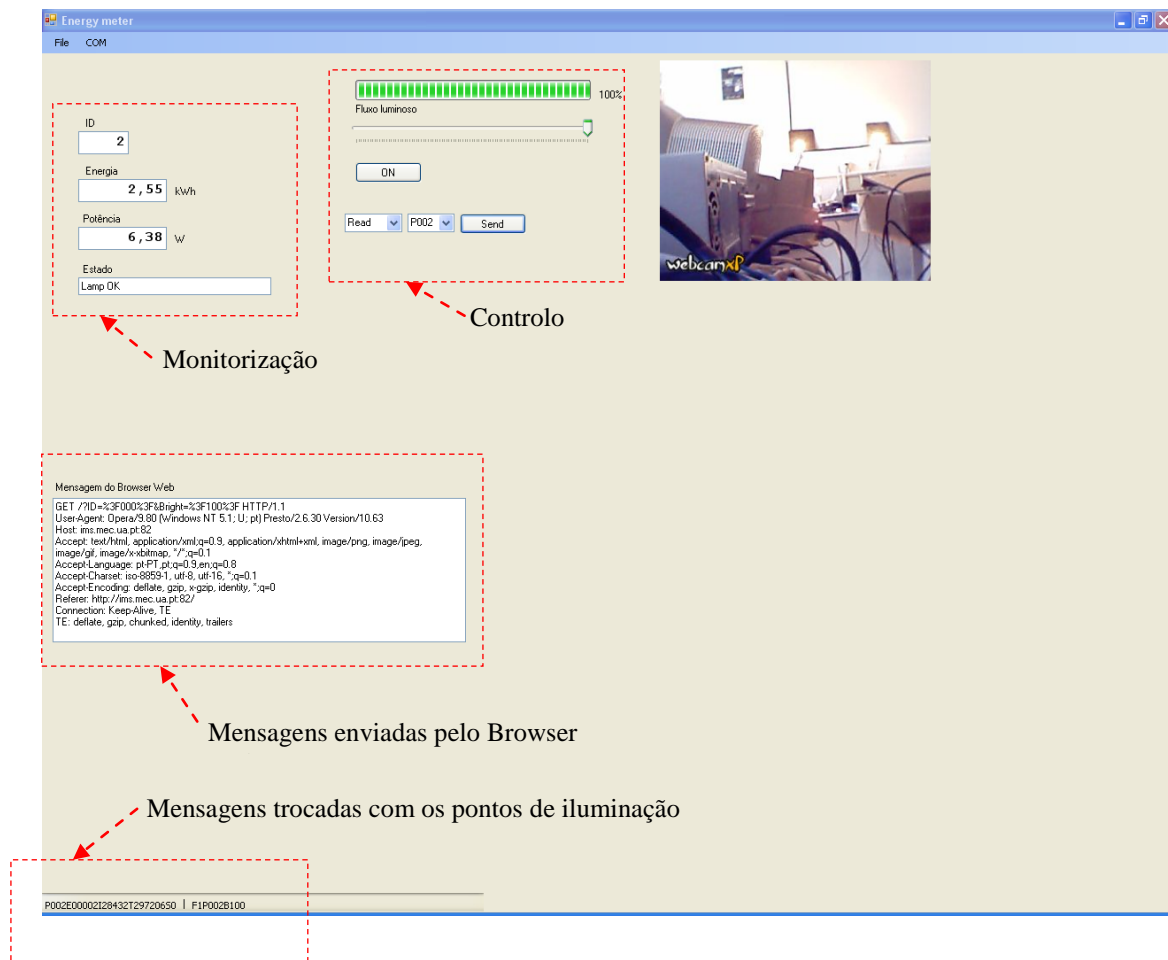


Figura 5.3: Interface da aplicação VB.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram o aspecto do portal Web. Na página de controlo a selecção dos parâmetros é feita através de duas *combo-box*, a ordem é enviada após premir o botão que se encontra imediatamente abaixo. Para que o utilizador tenha um *feedback* visual e em tempo real da acção de controlo do protótipo implementado, foi adicionada à página a imagem captada por uma *webcam* instalada no laboratório.

Para visualizar correctamente a página de supervisão é necessário instalar o *plugin* Flash Player, uma vez que um dos gráficos apresentados foi desenvolvido em Flash.

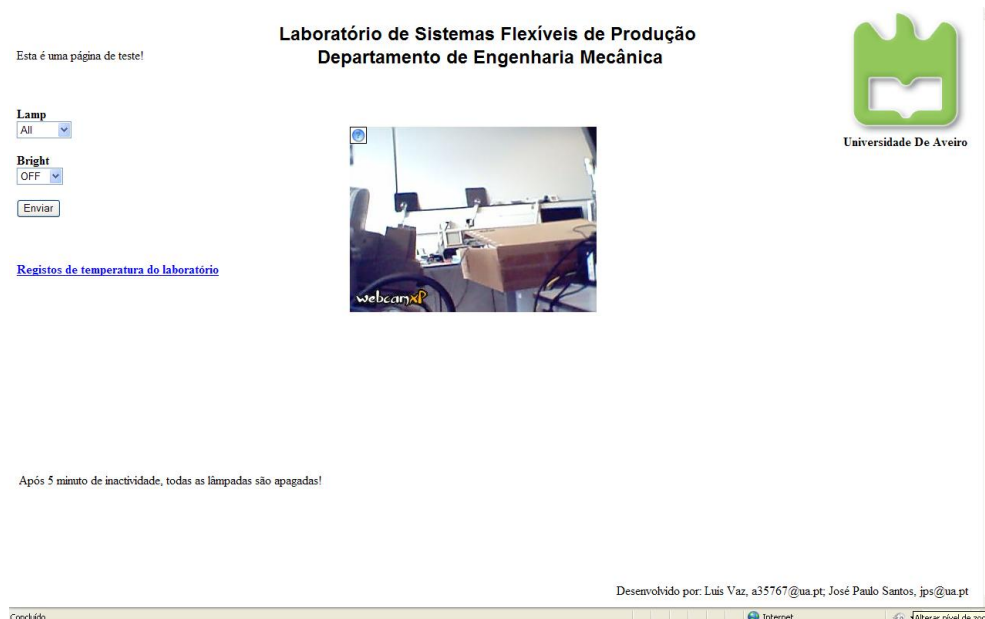


Figura 5.4: Interface Web de controlo.

No primeiro gráfico da página de supervisão é possível consultar a energia consumida por cada ponto de iluminação numa base horária, enquanto que no segundo é possível consultar a potência fornecida a cada ponto de iluminação, também numa base horária.

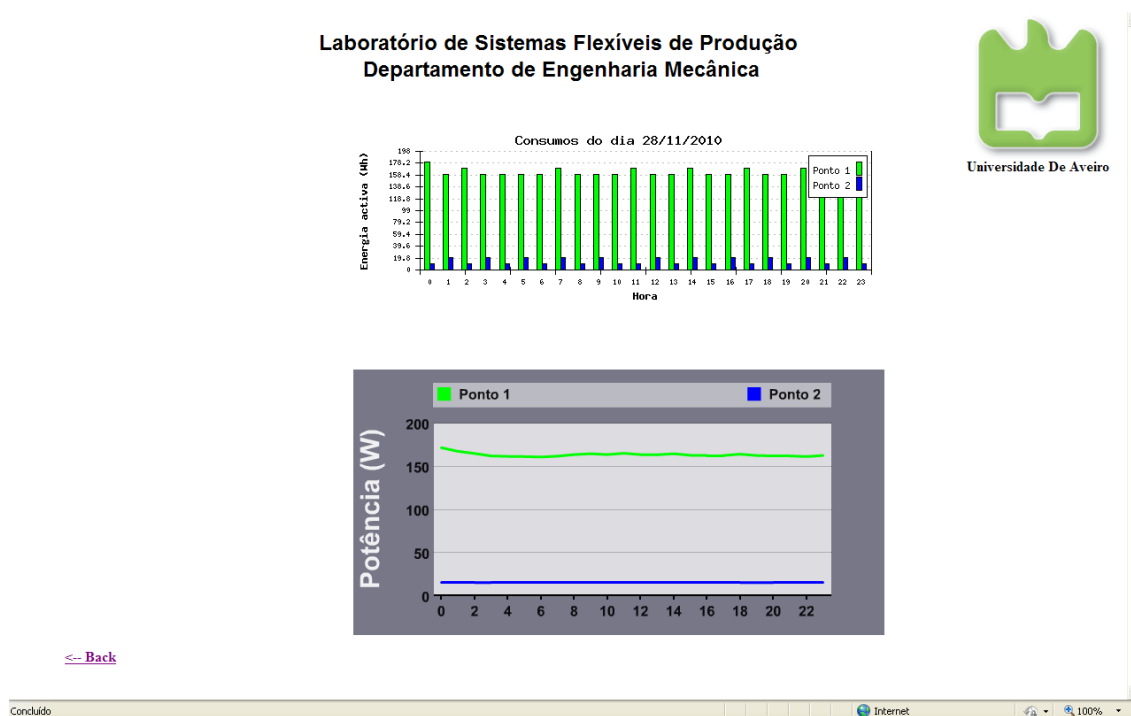


Figura 5.5: Interface Web de supervisão (provisória).

## 5.2 Análise de desempenho

Nesta fase de desenvolvimento do protótipo não foram implementados ciclos de iluminação pré-programados, pelo que o controlo da iluminação terá que ser feito pelo gestor do sistema através da aplicação VB ou do portal Web. No que diz respeito à supervisão dos pontos de iluminação, esta é feita numa base horária em que os dados recebidos na central são processados automaticamente e armazenados numa base de dados.

O software desenvolvido para o controlo e supervisão do sistema mostrou ser eficiente e robusto. Quando o controlo da iluminação é feito a partir da aplicação VB o tempo de resposta é menor, no entanto a diferença não é muito significativa em relação ao portal Web. O sistema de mensagens proposto mostrou ser indicado para o tipo e quantidade de informação que circula no sistema. Se eventualmente for necessário adicionar novos campos à estrutura das mensagens, essa alteração pode ser conseguida com uma pequena modificação no *software* do micro-controlador e da aplicação VB. O portal Web foi testado com sucesso em quatro browsers Web, são eles Internet Explorer, Mozilla Firefox, Opera e Google Chrome.

As medições efectuadas pelo módulo de *hardware*, energia e potência, não foram validadas por um equipamento homologado. Ainda assim, ao medir o consumo de uma lâmpada incandescente com uma potência nominal de 60W, incluindo o consumo do próprio módulo, o valor da potência medida foi 69W o que representa um valor espectável. A detecção de avaria na lâmpada é feita com base na comparação entre a potência medida e a percentagem de fluxo luminoso definida pelo gestor do sistema, desta forma se o valor definido for superior a 0% e a potência medida corresponder somente ao consumo do módulo de *hardware* significa que a lâmpada não está a funcionar.

O funcionamento do módulo de *hardware* origina ruído electromagnético e poderá também provocar a alteração do factor de potência, o que é indesejável na rede eléctrica. Para resolver este problema deveria ter sido implementado *hardware* auxiliar para corrigir o factor de potência e um filtro para minimizar o ruído.

O custo estimado para o módulo de hardware desenvolvido é de 117.39€, valor este que não inclui componentes de baixo custo tais como resistências e condensadores. Os preços que constam da Tabela 5.1, à excepção dos módulos XBee e do transformador, foram consultados

no Web site do distribuidor de material electrónico Farnell e correspondem a encomendas superiores a 100 unidades. É importante salientar que os transdutores de tensão e corrente representam cerca de 74% do custo total.

Tabela 5.1: *Lista dos componentes principais do módulo de hardware e respectivo custo.*

Dispositivo	Quantidade	Preço
PIC16F877A	1	3,55€
XBee	1	15,68€
MCP3909	1	1,45€
Lem LV25-P	1	69,03€
Lem LTS15-NP	1	17,95€
OpAmp OPA277	1	1,13€
Triac	1	0,65€
MOC3021	1	0,41€
Transformador	1	5,00€
Reguladores de tensão	4	0,31€
Ponte rectificadora	2	0,65€
<b>TOTAL</b>		<b>117.39€</b>

## Capítulo 6

# Conclusões

Neste trabalho é apresentado o protótipo de um sistema de supervisão e controlo da iluminação da via pública. Após estudar e analisar o funcionamento de outros sistemas do género, optou-se por apresentar uma solução em que cada luminária é controlada de forma independente das restantes para que seja possível a medição de consumos e detecção de avarias de cada lâmpada. O controlo do sistema é efectuado a partir de uma central de comando recorrendo à aplicação em VB implementada num computador, ou então a partir de um portal Web. A aplicação Web representa uma vantagem em relação a muitos dos sistemas existentes, uma vez que permite ao gestor de energia controlar o sistema através da internet em qualquer parte do mundo, bem como consultar o histórico de dados armazenados na base de dados.

No desenvolvimento dos módulos de *hardware* procurou-se utilizar componentes e dispositivos de baixo custo sem comprometer a fiabilidade. À excepção dos transdutores de tensão e corrente objectivo foi conseguido. O custo dos transdutores representa cerca de 74% do custo total estimado para os módulos de *hardware* e devido ao seu funcionamento obrigam a ter uma fonte de alimentação complexa, pelo que é conveniente ponderar outras opções menos dispendiosas.

O protótipo desenvolvido ainda não permite controlar o fluxo luminoso de lâmpadas de descarga em gases. Se por um lado é verdade que este é o tipo de lâmpadas mais utilizado em sistemas de iluminação pública, é também verdade que a tecnologia LED está a evoluir a um ritmo considerável e, segundo alguns especialistas, será a tecnologia de iluminação do futuro. A decisão de avançar, ou não, para o desenvolvimento de *hardware* que permite controlar lâmpadas de descarga em gases deverá ser fundamentada com base num estudo das perspectivas de evolução da tecnologia LED nos próximos anos, para que não se desenvolva “hoje” um sistema de controlo que num futuro próximo deixe de fazer sentido.

A escolha dos módulos *wireless* XBee para troca de informação entre a central e os pontos de iluminação mostrou ser acertada. Uma das características destes módulos é o baixo

consumo de energia, o que faz todo o sentido numa solução em que o principal objectivo é poupar energia. O alcance de comunicação destes módulos, 100 m em linha de sinal, é suficiente para cobrir a distância entre dois pontos de iluminação. Se eventualmente a distância entre a central e o ponto de iluminação mais próximo for superior ao alcance de comunicação poderá ser utilizada outra tecnologia para resolver este problema, por exemplo o GSM/GPRS. Outro aspecto que pesou na decisão de optar por módulos XBee foi o facto de estes possuírem uma interface série RS232, o que permitiu simplificar bastante desenvolvimento do *software*. Quanto à baixa taxa de transmissão de dados, que é apresentada como uma desvantagem em relação a outras tecnologias de comunicação sem fios, não representou qualquer problema neste trabalho, uma vez que as mensagens trocadas são pequenas e a uma cadência relativamente baixa.

Por outro lado, o micro-controlador escolhido para este trabalho, o PIC16F877A, não foi a melhor opção. Este é responsável por gerir as comunicações, o controlo da lâmpada e medir os consumos pelo que chegou ao limite da sua capacidade de processamento. Uma das consequências desta escolha foi abdicar da interface SPI do analisador de energia para obter os dados de tensão, corrente e potência uma vez que o tratamento destes dados exige uma grande capacidade de processamento, ao invés disso foram processados os pulsos de energia fornecidos pelo analisador.

O desempenho do MCP3909 foi altamente condicionado pela escolha do micro-controlador. Com a interface de pulsos de energia apenas foi possível obter a energia consumida e também a potência activa, o que ainda assim foi um resultado bastante positivo dada a impossibilidade de processar os dados provenientes da interface SPI.

No geral este trabalho cumpre os objectivos inicialmente propostos. Tratando-se de um protótipo, muito há a fazer para o melhorar e nesse sentido são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros,

- Adicionar sensores de luminosidade e de presença (ultra-sons e/ou infravermelho) ao módulo de *hardware* para seja possível fazer um reconhecimento das condições luminosidade e de tráfego do local e agir de acordo.
- Adicionar um RTC (*Real Time Clock*) para que seja possível implementar ciclos pré-programados de iluminação no *software* do micro-controlador e também contabilizar

o número de horas de funcionamento da lâmpada. Neste caso seria interessante implementar um micro-controlador disponibilizado recentemente pela Microchip, o PIC18F87J72, que conta com um RTC e analisador de energia integrados.

- Estudar a possibilidade de colocar um micro-controlador auxiliar dedicado ao controlo da lâmpada e processamento de mensagens, e desta forma aliviar o micro-controlador principal destas tarefas.
- Estudar uma nova tecnologia de comunicações sem fios, o Dash7, que promete ser melhor que o ZigBee em vários aspectos, nomeadamente alcance da comunicação e consumo de energia. Para além disso esta tecnologia utiliza a faixa de frequências dos 433 MHz o que reduz a hipótese de interferências na comunicação face aos concorrentes directos que utilizam os 2.4 GHz.
- Implementar transdutores mais baratos do que os utilizados ou em alternativa um divisor resistivo para a tensão e uma resistência de Shunt para a corrente.
- Adicionar funcionalidades ao *software* desenvolvido, no sentido de permitir definir os ciclos de iluminação pré-programados, entre outros parâmetros, e também melhorar a interface com o utilizador. No portal Web, seria interessante implementar um sistema de autenticação com *login* e *password* de forma a limitar o acesso. Com este sistema também seria possível fazer uma distinção entre o gestor do sistema e um utilizador comum, desta forma qualquer cidadão teria a possibilidade de consultar o histórico de consumos de energia do sistema de iluminação pública do seu Município, por exemplo.





## Apêndice A

# Configuração dos módulos XBee

Tanto no meio industrial como no doméstico os níveis de automação têm vindo a crescer consideravelmente. Com o aumento do número de dispositivos a controlar, aumenta também a dificuldade em integrar todos esses dispositivos numa rede. A tecnologia ZigBee vem facilitar essa integração uma vez que uma rede ZigBee suporta mais de 65000 dispositivos e para além disso é uma tecnologia sem fios, permitindo assim reduzir o espaço ocupado pela cablagem e também o seu custo.

Actualmente diversos fabricantes apresentam módulos de comunicação baseados na tecnologia ZigBee, para este trabalho foram seleccionados os módulos produzidos pela Digi International, extinta MaxStream [DIGI, 2010]. Este fabricante apresenta duas soluções, o módulo XBee e o XBee-Pro (Figura A.1) sendo que as principais diferenças entre eles residem no alcance da comunicação e no consumo de energia durante a transmissão de dados. Os módulos podem ainda ser diferenciados quanto ao tipo de antena utilizado, que poderá do tipo *chip*, “chicote” (um pequeno fio) ou antena externa.

Os módulos XBee e XBee-Pro para além da comunicação de dados possuem outras funcionalidades, tais como entradas analógicas, entradas e saídas digitais e PWM, nesta trabalho apenas é utilizada a funcionalidade de comunicação de dados.

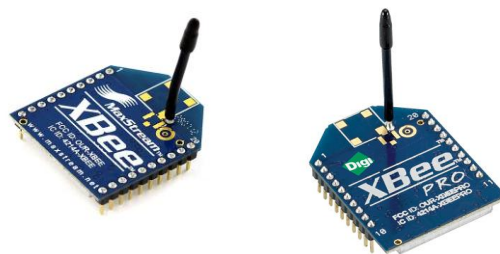


Figura A.1: Módulo XBee e XBee-Pro.

## Características técnicas

Tabela A.1. *Características técnicas do módulo XBee* [XBEE, 2009].

Característica	XBee	XBee-Pro
Alcance (indoor/outdoor) (m)	30 / 100	100 / 1600
Potência de saída da transmissão (mW)	1	50
Alimentação (V)	2.8-3.4	2.8-3.4
Corrente de transmissão (mA)	45	215
Corrente de recepção (mA)	50	55
Dimensões (cm)	2.438 x 2.761	2.438 x 3.294
Peso (g)	3	3

## Diagrama de pinos

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ/ DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP / DIO9	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / ID Button	Either	Analog Input 0, Digital I/O 0, or Node Identification

### Design Notes:

- Minimum connections: VCC, GND, DOUT & DIN

Figura A.2: Diagrama de pinos do módulo XBee [XBEE, 2009].

## Como utilizar e configurar os módulos XBee

Os módulos XBee vêm configurados de fábrica para operar no seu modo mais simples, permitem enviar e receber mensagens pela porta série e basta conectar quatro pinos, GND, Vcc, RX e TX. Para facilitar a configuração destes módulos a Digi [Digi, 2010] desenvolveu o software X-CTU. Uma alternativa a este software é a configuração por comandos AT.

Para conectar o módulo XBee à porta série do computador é necessário um adaptador. Existem adaptadores para esse efeito e contam ainda com outras funcionalidades, no entanto neste trabalho optou-se por desenvolver um adaptador mais simples. Caso o computador não possua porta série, será necessário utilizar um conversor de RS232 para USB, como demonstra a Figura A.3.

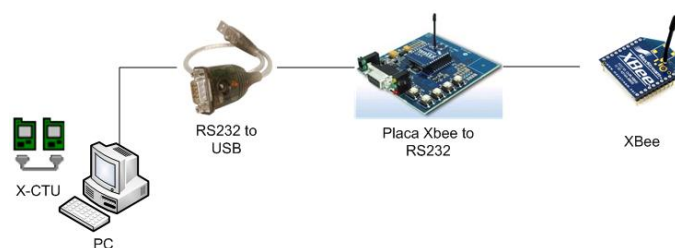


Figura A.3: Ligação entre o computador e o módulo XBee.

### Configuração através do software X-CTU

Após conectar o módulo XBee à porta série do computador e iniciar *software* X-CTU é necessário seguir executar os seguintes passos:

- 1- No separador “PC Settings” seleccionar a porta ao qual se encontra conectado o XBee e também os parâmetros da comunicação, como demonstra a figura A.4.

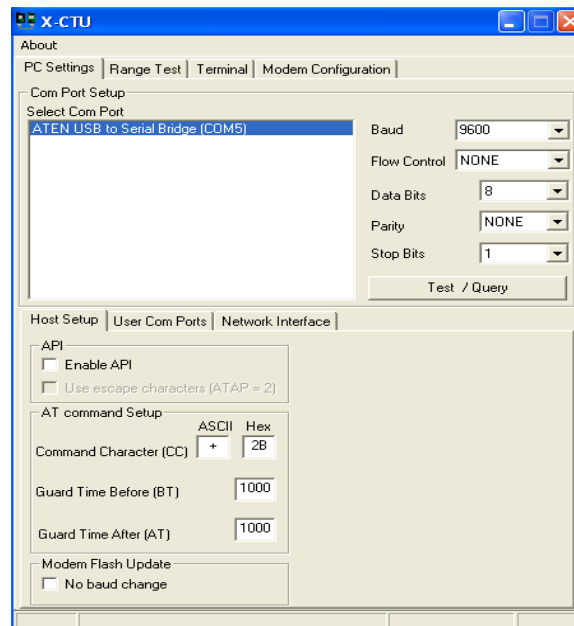


Figura A.4: Configuração da comunicação entre o computador e o módulo XBee.

2- No separador “Modem Configuration” é necessário indicar o qual o modelo do XBee que está a ser utilizado. Se o modelo for conhecido basta seleccionar na *combo-box*, “Modem XBee”, caso contrário ao premir o botão “Read” é feito o reconhecimento automático (ver figura A.5).

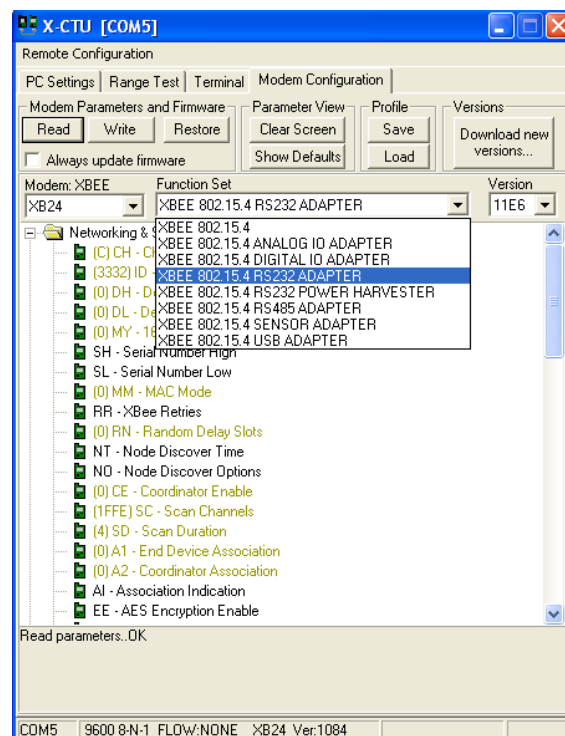


Figura A.5: Configuração do módulo XBee.

3- Seleccionar na *combo-box* “Function Set” a opção *XBEE 802.15.4 RS232 ADAPTER* para que o módulo XBee funcione como adaptador de RS232. Na janela imediatamente abaixo devem ser alterados os parâmetros indicados na Tabela A.2.

4- Depois de alterados os parâmetros, ao premir botão “Write” estes são armazenados na memória do módulo XBee. Durante a configuração é sugerido que se faça uma actualização do *firmware* do módulo e é conveniente aceitar.

### **Configuração através de comandos AT**

Uma forma alternativa ao X-CTU para configurar os módulos XBee passa por utilizar comandos AT. Trata-se de uma linguagem de comando orientada por linhas [RIBEIRO, 2006] e cada linha divide-se em dois ou três campos consoante se trate de um comando de escrita ou leitura e por um caractere terminal que no caso dos módulos XBee pode ser o CR (*Carriage Return*) ou o LF (*Line Feed*).

“Prefixo” + “Comando” + “Valor” + “<CR>”

Os comandos AT podem ser enviados a partir de qualquer terminal (HyperTerminal, Termite, Docklight, etc) no entanto alguns destes não permitem visualizar correctamente a resposta do módulo, pelo que se aconselha a utilizar o terminal Docklight ou em alternativa o que está integrado no software X-CTU.

Para entrar no modo de comandos a partir do terminal basta digitar a sequência de caracteres “+++” com um intervalo de tempo o mais curto possível entra cada caractere (Não resulta se premir a tecla “+” continuamente). Se tudo correu bem, o módulo responde com a mensagem “OK<CR>”. Ao fim de poucos segundos se nenhum comando tiver sido enviado o módulo retorna ao modo de operação, pelo que os comandos devem ser enviados num curto espaço de tempo.

Para enviar um comando para o módulo basta digitar o prefixo AT seguido do comando e do valor, e aguardar pela resposta do módulo. A Tabela A.2 mostra os parâmetros que são necessários para configurar um módulo XBee como adaptador de RS232. Para saber quais os valores que cada parâmetro pode tomar deve ser consultado o manual do módulo XBee [XBEE, 2010].

Tabela A.2. *Parâmetros necessários para configurar um módulo XBee.*

Comando	Tipo	Descrição
CH	R/W	Canal a utilizar
ID	R/W	Endereço da rede
DH/DL	R/W	Endereço de destino (High/Low)
MY	R/W	Endereço do módulo
NI	R/W	Nome do módulo na rede
BD	R/W	Baud Rate
NB	R/W	Paridade
D6	R/W	Controlo de fluxo (RTS)
D7	R/W	Controlo de fluxo (CTS)
DB	R	“Força” do sinal recebido
ND	R	Descobrir módulos ligados na rede
CN	W	Sair do modo de comando
RE	W	Repor as definições de fábrica
WR	W	Guardar as alterações feitas no módulo

### Definições de rede

**CH** – O padrão ZigBee oferece a possibilidade de operar em vários canais. Para que dois ou mais módulos possam comunicar entre si estes devem operar no mesmo canal.

**ID** – Este parâmetro define o PAN ID (Personal Area Network). Para que dois ou mais módulos comuniquem entre si na mesma rede sem interferir com redes vizinhas, este devem possuir o mesmo PAN ID e ser diferente das outras redes.

**DL/DH** – Para que um módulo envie mensagens exclusivamente para outro módulo é necessário definir o endereço de destino da mensagem. O Destination Address High (DH) e o Destination Address Low (DL) podem ser configurados de maneira a que um módulo envie mensagens para um único endereço.

**MY** – Para que outros módulos possam enviar mensagens exclusivamente para um módulo é necessário que este tenha um endereço. O parâmetro MY permite definir o endereço do módulo.

**NI** – O parâmetro NI permite atribuir um nome ao módulo para que seja facilmente identificado na rede. O tamanho máximo está limitado a 20 caracteres.

**ND** – Este comando permite identificar todos os módulos que estão ligados em rede.

### Definições de comunicação RS232

**BD** – Define a taxa de transferência de dados.

**NB** – Define o tipo de paridade ou simplesmente desactiva.

**D6** – Activar ou desactivar o controlo de fluxo RTS (*Request To Send*).

**D7** – Activar ou desactivar o controlo de fluxo CTS (*Clear To Send*).

### Definições de configuração

**RE** – Para repor as definições de fábrica.

**WR** – Para gravar as alterações efectuadas no módulo XBee.

**CN** – Para abandonar o modo de comandos AT.

Dependendo do comando enviado podem ser esperadas diferentes respostas do módulo, como é possível verificar na Tabela A.3.

Tabela A.3. Mensagens de resposta do módulo XBee.

Resposta	Descrição
"Valor<CR>"	Retorna o valor do parâmetro
"OK<CR>"	Em caso de sucesso na definição do parâmetro
"ERROR<CR>"	Comando/Valor inválido

Por exemplo, para entrar no modo de comando e definir o PAN ID do módulo como sendo 1111, basta enviar os comandos "+++" e "ATID1111<CR>" pela ordem apresentada na Figura A.6.

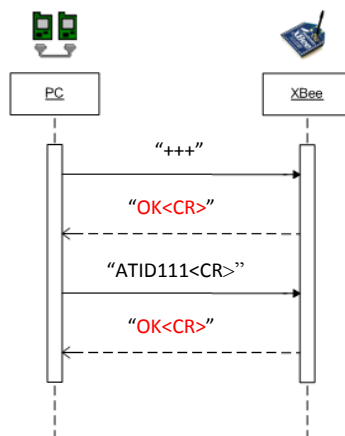


Figura A.6: Troca de mensagens entre o PC e o módulo XBee.

Na Tabela A.4 é apresentado um exemplo de configuração de dois módulos XBee para que estes comuniquem entre si. É necessário garantir que tenha seleccionado o mesmo canal de comunicação, o PAN ID bem como os mesmos parâmetros da comunicação série.

Tabela A.4. *Configuração dos módulos XBee.*

Parâmetro	PC	Micro-controlador
	Valor	
CH	C	C
ID	1111	1111
MY	0	1
DH	0	0
DL	1	0
NI	PC	Micro
BD	3 (9600 bit/s)	3
NB	0 (sem paridade)	0
D6	0 (sem controlo de fluxo)	0
D7	0 (sem controlo de fluxo)	0



## Apêndice B

# Memória EEPROM com interface SPI

Em determinadas aplicações nas quais existe troca de informação entre dispositivos, por vezes surge a necessidade de armazenar essa informação de forma não volátil. Por exemplo armazenar as leituras de um sensor ou mesmo armazenar o valor acumulado de determinada grandeza, por exemplo energia, isto para que a informação não se perca em caso de falha de energia no circuito.

Neste apêndice é feita uma pequena descrição do protocolo de comunicações SPI (*Serial Peripheral Interface*) e de seguida é descrito o funcionamento de uma memória EEPROM Flash com interface SPI, trata-se do modelo M25PE16 da ST Microelectronics.

### O protocolo SPI

O protocolo de comunicações SPI foi inicialmente desenvolvido pela Motorola para a família de processadores MC68K e tinha como objectivo facilitar a comunicação entre o processador e os dispositivos periféricos. Mais tarde, a National Semiconductor apresentou um protocolo semelhante denominado Microwire, o princípio de funcionamento é semelhante no entanto o SPI é mais versátil na medida em que permite configurar alguns dos parâmetros da comunicação [SCIENCEPROG, 2008].

### Topologia de rede e tipo de comunicação

O protocolo SPI prevê a existência de um dispositivo controlador (*Master*) que é responsável por comandar os restantes (*Slaves*). Num barramento SPI típico, tal como mostra a Figura B.1, existem duas linhas de dados, SDI e SDO, uma de sinal de relógio, SCK, e mais uma por cada *Slave*, sendo que o número de máximo de *Slaves* está dependente do número de saídas digitais de dispositivo controlador. Usualmente o meio físico de transmissão são pistas de cobre em placas de circuito impresso, no entanto nada impede de utilizar simples fios de cobre, ou outro condutor, para interligar os dispositivos.

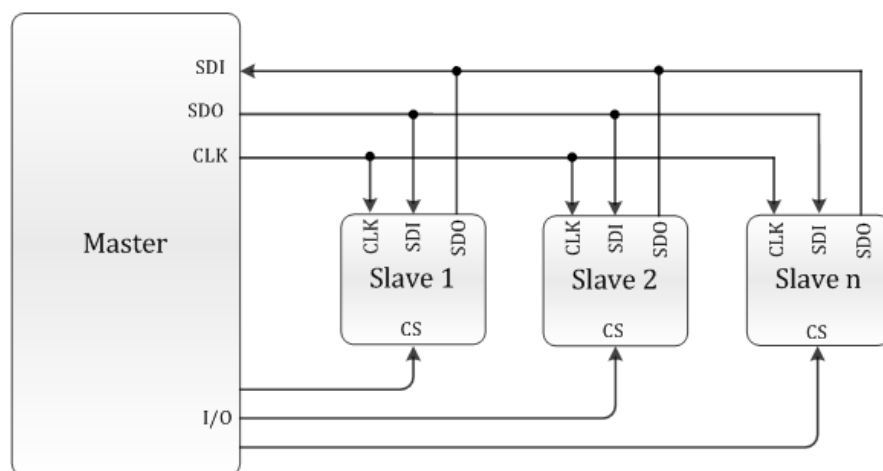


Figura B.1: Barramento SPI.

Dependendo do fabricante do dispositivo, a nomenclatura dos pinos associados à comunicação SPI pode variar, de seguida são apresentadas as nomenclaturas mais comuns:

- **SDI, MISO** ou **SI** - Serial Data In/ Master Out Slave In / Serial In. Este pino está associado à recepção de dados e é conectado ao pino SDO de outro dispositivo.
- **SDO, MOSI** ou **SO** - Serial Data Out / Master Out Slave In / Serial Out. Este pino está associado à transmissão de dados e é conectado ao pino SDI de outro dispositivo.
- **SCK** ou **SCLK** - Serial Clock. Este pino está associado ao sinal de relógio e todos os dispositivos envolvidos na comunicação devem estar conectados à mesma linha de relógio que é controlada pelo dispositivo *Master*.
- **CS** ou **SS** - Chip Select / Slave Select. Uma vez que o protocolo SPI não permite endereçamento de mensagens, a selecção do dispositivo ao qual o controlador se pretende ligar é feita através de uma linha física, que consoante o seu nível de tensão activa ou desactiva o dispositivo.

A comunicação de dados SPI é síncrona, ou seja, a transmissão e recepção de dados é feita em instantes de tempo definidos pelo sinal de relógio. Este sinal de relógio é gerado e controlado pelo dispositivo que assume o papel de *Master* e trata-se de uma onda quadrada com uma frequência que configurável e que influencia a velocidade de transmissão de dados.

Quanto ao fluxo de dados a comunicação SPI é *full-duplex*, ou seja, a transmissão e recepção de dados é feita em simultâneo [MICROCHIP, 2002].

### Formato das mensagens

No protocolo SPI as mensagens trocadas entre os vários dispositivos são de 8 bits (1 byte) e podem ser instruções, endereço, dados ou um valor sem significado. Na maior parte dos casos os dispositivos com interface SPI estão organizados por registos e zonas de memória, caso se tratem de memórias, que podem ser escritos ou lidos. O dispositivo que assume o papel de *Master* toma a iniciativa de enviar mensagens, o *Slave* apenas responde.

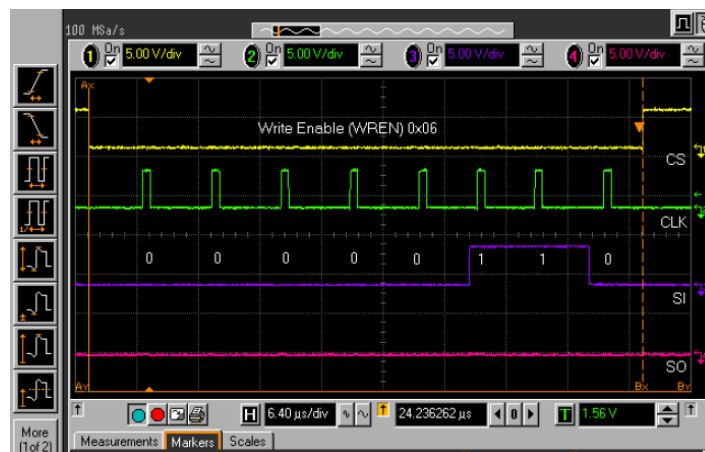


Figura B.2: Mensagem SPI analisada no osciloscópio [AN1006, 2005].

A Figura B.2 resulta de uma análise às linhas de comunicação no osciloscópio durante o envio de uma mensagem. Desde que o *Slave* é seleccionado até que sejam enviados os oito bits da mensagem a linha CS mantêm-se a 0V. O início da transferência da mensagem dá-se precisamente quando o relógio é activado pelo Master. Quando é enviado o último bit o relógio retorna ao estado inactivo, 0V neste caso, e também a linha CS retorna a 5V.

## Parâmetros configuráveis da comunicação SPI

- **Amostragem do sinal de entrada**

A amostragem do sinal de entrada (pino SDI) é feita após o início da transmissão de cada bit pelo dispositivo Master. Existe a possibilidade de escolher se a amostragem é feita no meio ou no fim da transmissão. Mais à frente será descrito como configurar esta opção.

- **Polaridade do relógio e fase**

A polaridade do relógio define se o relógio está inactivo a 0 ou a 5V. A fase do relógio define quando é que são transmitidos os bits de dados, na transição de 0 para 5V ou vice-versa. Por consequência, a fase do relógio está dependente da polaridade. Diferentes dispositivos, permitem diferentes modos de operação, ou seja, diferentes combinações destes dois parâmetros, ver figura B.3. Caso o Master e o Slave estejam configurados com modos de operação diferentes é possível que exista troca de informação, no entanto não tem qualquer significado. Dependendo da literatura a polaridade de relógio é representada por CPOL ou CKP, e CPOL é igual CKP. A fase do relógio pode ser representada por CPHA ou CKE, e CPHA é a igual à negação de CKE.

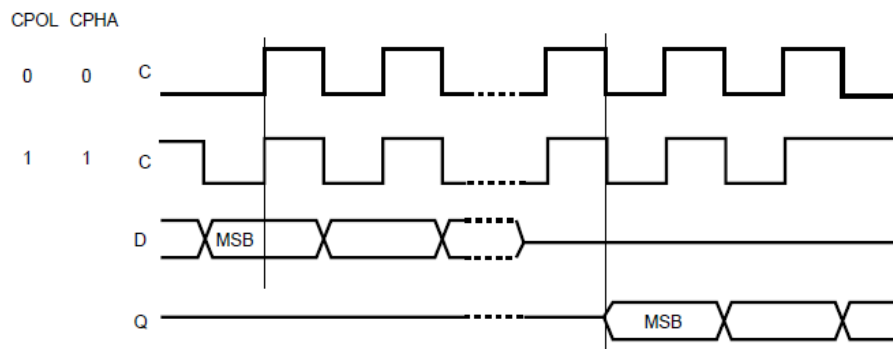


Figura B.3: Modos SPI suportados pela EEPROM [M25PE16, 2008].

- **Velocidade da transmissão de dados**

Na verdade a velocidade de transmissão é controlada indirectamente pela frequência do relógio, mais à frente neste apêndice é descrito como alterar frequência do relógio no micro-controlador PIC16F877A.

## A memória EEPROM

Uma EEPROM, acrónimo de Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, é um tipo de memória não-volátil que pode ser escrita cerca de 100 000 vezes e lida um número praticamente infinito de vezes. Ao contrário de uma EPROM que para ser apagada tem que ser sujeita a luz ultravioleta, uma EEPROM apagada electricamente e a retenção de dados vai para além dos 20 anos [M25PE16, 2008].

### Diagrama de pinos

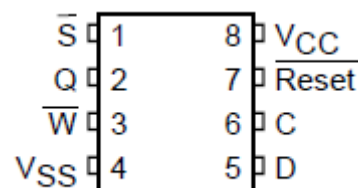


Figura B.4: Diagrama de pinos da EEPROM [M25PE16, 2008].

Existem dois pinos que requerem especial atenção, são eles,

- **Write protection (W)** – a tensão aplicada a este pino conjugada com o valor de um registo interno da EEPROM definem quais as zonas de memória que podem ser escritas. Neste pino deve ser colocada uma resistência de pull-up.
- **Reset** – a tensão aplicada a este pino define se a EEPROM está activa ou não. Para aceder à EEPROM este pino deve ser sujeito à uma tensão de alimentação, quando a tensão neste pino é 0V significa que está no modo de reset e não efectua qualquer operação. Neste pino deve ser colocada uma resistência de pull-up.

### Organização da memória

A EEPROM M25PE16 tem uma capacidade de 16 Mbits e está dividida em 8192 páginas com 256 bytes cada [M25PE16, 2008], ver figura 1.8.

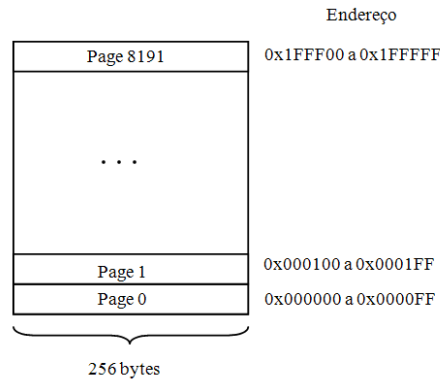


Figura B.5: Organização da EEPROM M25PE16.

### Registos internos

Para além das zonas de memória que podem ser acedidas, existem um registo específico que permitem configurar as opções de protecção de escrita bem como verificar se existe algum processo de escrita a decorrer. Trata-se do *Status Register* e é mostrado na figura B.6.

R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	R	R
SRWD	0	0	BP2	BP1	BP0	WEL	WIP

Figura B.6: Status Register.

Os bits SRWD, BP2:0 estão associados à protecção de escrita na EEPROM. Para mais informações sobre protecção de escrita deve ser consultado o manual da EEPROM. O bit WEL indica se a escrita na EEPROM está activa (1) ou inactiva (0). Este bit é alterado para o valor 1 de acordo com uma instrução específica, mais à frente será abordada. O bit WIP = 1 indica que está a decorrer um processo de escrita, este é limpo automaticamente quando termina o processo de escrita.

Existem ainda um conjunto de quatro registos que podem ser apenas lidos e tratam-se da identificação da EEPROM. O valor destes registos é conhecido para este tipo específico de memória, são eles:

- Manufacturer ID : 0x20
- Memory type : 0x80
- Memory capacity : 0x15
- CFD length : 0x10

### Instruções da EEPROM

A EEPROM estudada tem a capacidade de interpretar um conjunto de instruções e de acordo com a instrução recebida desencadeia um processo de escrita, leitura ou de configuração. As instruções são enviadas para a EEPROM através de SPI e começam com um código de 1 byte ao qual se podem seguir bytes de endereço, dados [M25PE16, 2008].

Para enviar instruções para a EEPROM começa-se por baixar o nível lógico do pino CS, logo de seguida é enviado o código da instrução, que tal como foi referido anteriormente pode ser seguido de bytes de endereço ou de dados. No final é necessário subir o nível lógico do pino CS para que a EEPROM execute a instrução [M25PE16, 2008].

De seguida serão descritas as instruções que permitem ler e escrever os registos da EEPROM e também as zonas de memória.

- **Write Enable**

Esta instrução é composta pelo código **0x06**, e deve ser enviada para a EEPROM para activar a escrita. A instrução faz com que o bit WEL do *Status Register* tome o valor 1, quando termina o processo de escrita o bit WEL é limpo pelo que é necessário enviar novamente a instrução caso se pretenda escrever na EEPROM.

- **Read Identification**

Esta instrução é composta pelo código **0x9F** seguida de 4 bytes cujo valor não interessa. É enviada para a EEPROM sempre que se pretende ler a sua identificação. A figura B.7 mostra a sequência de mensagens trocadas.

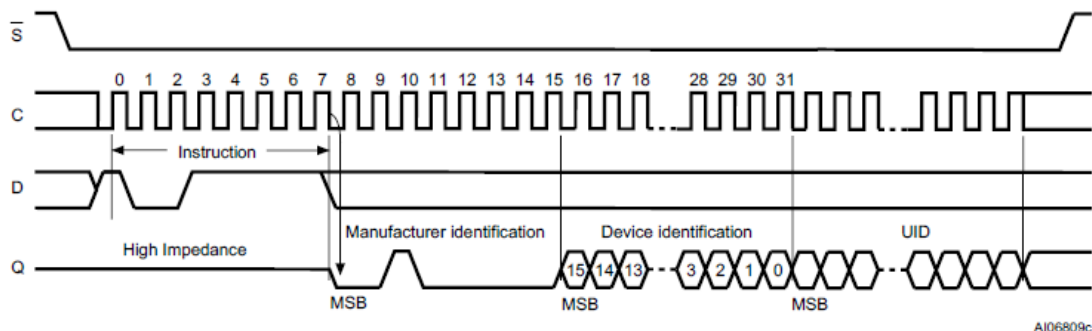


Figura B.7: Instrução Read Identification [M25PE16, 2008].

- **Read Status Register**

Esta instrução é composta pelo código **0x05** e um byte cujo valor não interessa. É enviada para a EEPROM quando se pretende ler o seu registo de estado.

- **Write Status Register**

Esta instrução é composta pelo código **0x01** e um byte de dados cujo valor é o que se pretende escrever no registo. Deve ser enviada para a EEPROM quando se pretende configurar as opções de protecção de escrita. Qualquer que seja o valor do byte de dados só terá efeito nos bits SRWD e BP2:0, uma vez que os restantes são apenas de leitura. A figura B.8 mostra a sequência de mensagens que é necessário enviar.

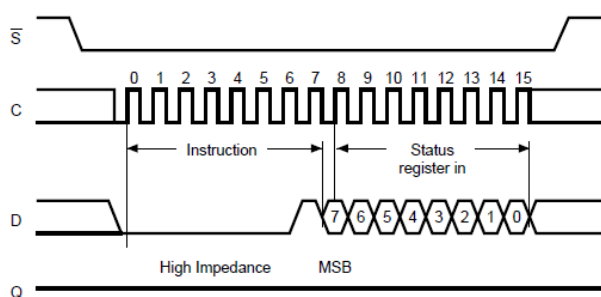


Figura B.8: Instrução Read Status Register [M25PE16, 2008].



- **Read Data Bytes**

Esta instrução é composta pelo código **0x03**, 3 bytes de endereço e um byte por cada zona de memória que se pretenda ler, cujo valor não interessa. Deve ser enviada para a EEPROM quando se pretende ler uma ou mais posições de memória consecutivas. Os 3 bytes de endereço referem-se à primeira posição de memória que se pretende ler, o endereço das posições seguintes é incrementado automaticamente.

- **Page Write**

Esta instrução é composta pelo código **0x0A**, 3 bytes de endereço e um determinado número de bytes de dados cujo valor é o que se pretende escrever na, ou nas posições de memória. Esta instrução permite escrever até 256 bytes de uma só vez e tal como acontece com a instrução anterior o endereço refere-se à primeira posição de memória. A figura B.9 mostra a sequência de mensagens que é necessário enviar.

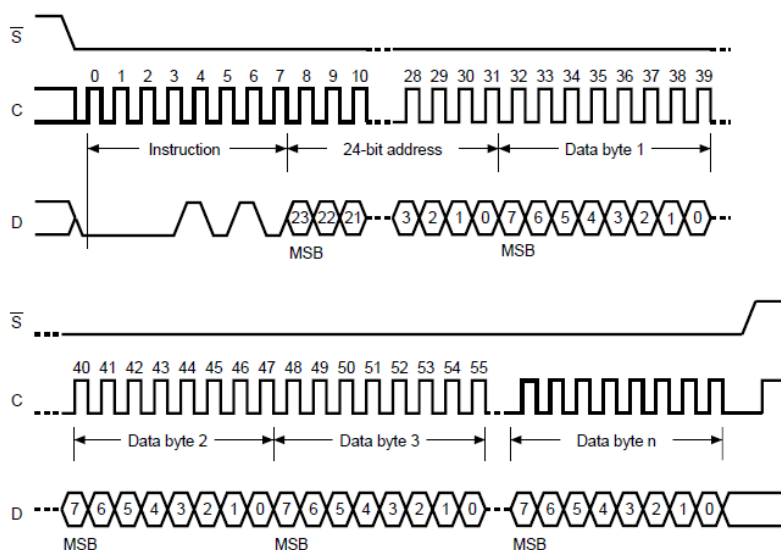


Figura B.9: Instrução Write Page [M25PE16, 2008].

De seguida é demonstrado como configurar o módulo SPI do micro-controlador PIC16F877A e são apresentados exemplos de funções desenvolvidas em linguagem C para leitura e escrita dos registos e zonas de memória da EEPROM.

## Configurar a interface SPI do micro-controlador

No que diz respeito à comunicação série SPI existem apenas dois registos que é necessário configurar. Como foi referido anteriormente a EEPROM estudada permite dois modos de operação SPI, neste exemplo é apresentada a configuração para o modo 1,1. Adicionalmente é necessário configurar a direcção dos pinos associados ao barramento SPI.

R/W-0	R/W-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0
SMP	CKE	D/Ā	P	S	R/W	UA	BF
bit 7							bit 0

Figura B.10: Registo SSPSTAT do micro-controlador [PIC16F877A, 2003].

A Figura B.10 mostra o registo SSPSTAT do micro-controlador. O bit SMP define se a amostragem do sinal de entrada é feito a meio (0) ou no final (1) da transmissão de um bit. Para o caso da EEPROM estudada o valor deste bit é indiferente. O bit CKE define a fase do sinal de relógio. No modo 1,1 o bit CKE toma o valor 0. O bit BF é apenas de leitura e permite saber se o buffer (SSPBUF) está completo (1) ou se ainda está a ser carregado (0).

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0
bit 7							bit 0

Figura B.11: Registo SSPCON do micro-controlador [PIC16F877, 2003].

A Figura B.15 mostra o registo SSPCON do micro-controlador. O bit SSPEN permite activar (1) ou desactivar (0) módulo SPI do micro-controlador. O bit CPK define a polaridade do relógio. No modo 1,1 o bit CPK toma o valor 1. Os bits SSPM3:0 permitem configurar o micro-controlador como *Master* ou *Slave* e também a frequência do relógio. Neste caso define-se o micro-controlador como *Master* e uma frequência de relógio  $F_{osc}/4$ . Para tal SSPM3:0 = 0000. Para mais informação sobre a configuração do módulo SPI deve ser consultado o manual do micro-controlador [PIC16F877A, 2003].

## Funções de escrita e leitura SPI

A troca mensagens entre o micro-controlador e a EEPROM dá-se sempre da mesma forma. Quando o micro-controlador envia uma mensagem de um byte a EEPROM responde

com outro byte. Assim sendo podem ser criadas duas funções auxiliares, uma para leitura e outra para escrita de um byte.

A função *RD\_BYTE* permite ler um byte que chega à porta SPI. A função retorna o valor do byte recebido.

```
char RD_BYTE( void )
{
    SSPBUF = 0xFF;           // Gerar sinal de relógio.
    while(!BF){};           // Espera que termine o envio.
    return SSPBUF;           // Retorna o valor do byte recebido.
}
```

A função *WR\_BYTE* permite enviar um byte pela porta SPI. Tem como argumento o byte que se pretende enviar e não retorna nenhum valor.

```
void WR_BYTE ( char dados )
{
    char lixo = 0x00;        // Variável local.
    SSPBUF = dados;          // Envia o byte.
    While (!BF){};           // Espera que termine o envio.
    lixo = SSPBUF;           // Descarta o byte recebido.
}
```

Com funções apresentadas anteriormente é possível criar outras funções mais complexas para o envio de instruções de configuração, leitura ou escrita para a EEPROM. Para isso basta conhecer a sequência de mensagens que é necessário enviar bem como o que se pretende receber, no caso de uma instrução de leitura. De seguida é apresentado o exemplo de uma instrução de leitura do *Status Register* da EEPROM, a Figura B.12 mostra a sequência de mensagens que é necessário enviar.

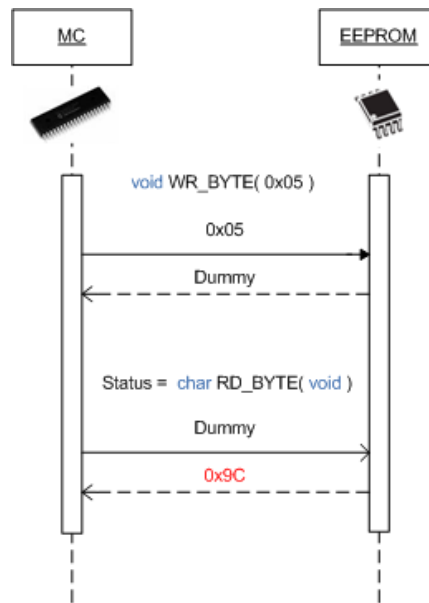


Figura B.12: Sequência de mensagens para ler o *Status Register*.

A primeira mensagem enviada pelo micro-controlador corresponde ao código de leitura do *Status Register*, ao qual a EEPROM responde com um byte cujo valor não interessa. De seguida o micro-controlador envia uma nova mensagem, cujo valor não interessa, e à qual a EEPROM responde com valor do *Status Register*.

A função de leitura do *Status Register* utiliza as duas funções referidas anteriormente e é descrita de seguida,

```

char RD_StatusRegister(void)
{
    char buf = 0x00;           // Variável local.
    RA5 = 0;                   // pino CS.
    WR_BYTE(0x05);              // Código de leitura do Status Register.
    buf = RD_BYTE();            // Faz uma leitura e armazena em "buf".
    RA5 = 1;                    // pino CS.
    return buf;                 // Retorna o valor do byte recebido.
}
  
```

Para testar e validar as funções desenvolvidas pode ser efectuada uma simples operação de escrita no *Status Register* da EEPROM seguida de uma leitura. Ao escrever neste registo o valor **0xFF**, o valor lido nunca poderá ser o mesmo. Como foi referido anteriormente, qualquer que seja o valor escrito no *Status Register* só tem efeito em quatro bits, são eles o bit 7, e 4 a 2. Quando termina o processo de escrita o bit 1 (WEL) toma o valor 0, e o bit 0 (WIP) toma o

valor 0 uma vez que não há nenhum processo de escrita a decorrer, com estas considerações se pode afirmar-se que se o valor lido do *Status Register* corresponder a é **0x9C** as funções desenvolvidas estão a funcionar correctamente.



## Apêndice C

# Interface SPI do analisador MCP3909

Actualmente, na grande maioria das habitações a energia consumida é contabilizada recorrendo a um contador electromecânico. Isto implica que periodicamente um funcionário da empresa fornecedora de energia se desloque a casa dos clientes para registar o valor consumido. Esta tecnologia é obsoleta e tem vindo a ser substituída por contadores inteligentes. Este tipo de contador, sendo totalmente electrónico, oferece a possibilidade de enviar os consumos para a empresa de energia através de GSM ou protocolo equivalente, sem que seja necessário um funcionário para recolher os dados.

Neste apêndice é descrito o funcionamento da interface SPI do analisador de energia MCP3909 da Microchip. Este permite recolher alguns parâmetros da linha eléctrica tais como Tensão, Corrente e Potência. Os dados podem ser acedidos por um micro-controlador que suporte o protocolo SPI, no entanto este circuito integrado também oferece a possibilidade de ser conectado directamente a contadores electromecânicos ou motores de passo de duas fases [MCP3909, 2009].

### Diagrama de pinos

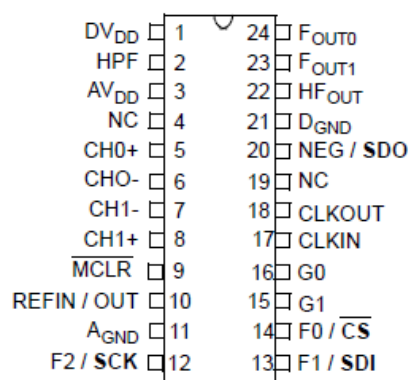


Figura C.1: Diagrama de pinos do analisador [MCP3909, 2009].

De seguida serão descritos em pormenor quatro pinos do analisador que requerem especial atenção.

**MCLR** – Quando o estado lógico deste pino é 0 significa que as ADC's não estão a efectuar qualquer conversão e o resultado apresentado será 0. Quando o estado lógico deste pino é 1 significa que as ADC's estão a efectuar as conversões e que o dispositivo se encontra no modo de interface série (SPI). Sempre que o estado lógico deste pino baixar para 0 o resultado das conversões será perdido [MCP3909, 2009].

**G0, G1** – O estado lógico deste conjunto de pinos permite seleccionar o ganho (PGA) do canal de corrente (CH0). A Tabela 1 mostra as configurações possíveis.

Tabela C.1. *Programmable Gain Amplifier* [MCP3909, 2009].

G0	G1	Ganho	$\Delta V$ CH0 (máx)
0	0	1	$\pm 470$ mV
0	1	2	$\pm 235$ mV
1	0	8	$\pm 60$ mV
1	1	16	$\pm 30$ mV

**HPF** – O estado lógico deste pino permite activar ou desactivar o filtro passa alto (HPF) que se encontra após as ADC's, ver diagrama de blocos da figura 1.4. Quando o filtro se encontra activo, HPF =1, a componente DC proveniente da rede ou mesmo do dispositivo é eliminada. No caso do filtro se encontrar desactivado permite que a componente DC seja medida [MCP3909, 2009].

## A interface SPI do analisador

Ao contrário de outros dispositivos, o MCP3909 não possui registos passíveis de serem lidos. Existe um pequeno conjunto de instruções de um byte que podem ser enviadas para o analisador e consoante a instrução enviada este devolve os dados relativos à tensão e corrente ou então à potência, seleccionando assim os modos de operação do analisador. As Figura C.2 mostram a forma como devem ser enviadas as instruções.



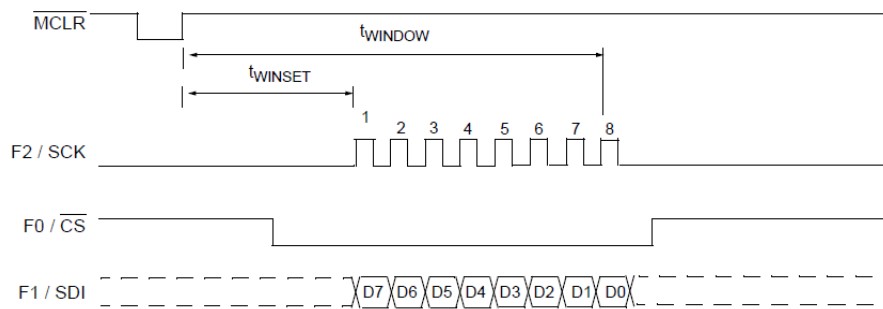


Figura C.2a: Instrução SPI [MCP3909, 2009].

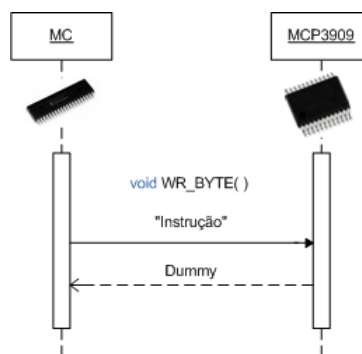


Figura C.2b: Troca de mensagens SPI.

A instrução SPI deve ser enviada após o flanco ascendente do MCLR e no intervalo entre  $t_{winset}$  e  $t_{window}$ . Estes tempos dependem valor do cristal utilizado. Para um cristal de 4MHz  $t_{winset} = 250\text{ ns}$  e  $t_{window} = 8\text{ }\mu\text{s}$  [MCP3909, 2009].

Sempre que existem novos dados para serem lidos, surge um pulso “DR” na linha de saída de dados SPI do analisador (SDO), ver figura C.4. Este pulso poderá eventualmente ser utilizado como interrupção para que após o seu flanco descendente o micro-controlador se encarregue de ler os dados. Os dados devolvidos pelo analisador encontram-se na notação de complemento para 2, também conhecido por *two's complement*<sup>9</sup>.

De seguida são descritas os modos de operação do MCP3909.

- **Multiplier Output mode**

**0xA1** (F2 pin = 0)

**0xA9** (F2 pin = 1)

<sup>9</sup> No final do apêndice é explicada a notação de complemento para 2.

Estas instruções fazem com que o analisador devolva os dados relativos à potência. A diferença entre elas reside no estado do pino F2 durante a selecção do modo. Os dados devolvidos têm 20 bits, como é possível verificar na figura C.3, mas como no protocolo SPI as mensagens trocadas são de 8 bits, adicionalmente são enviados 4 bits de valor 0.

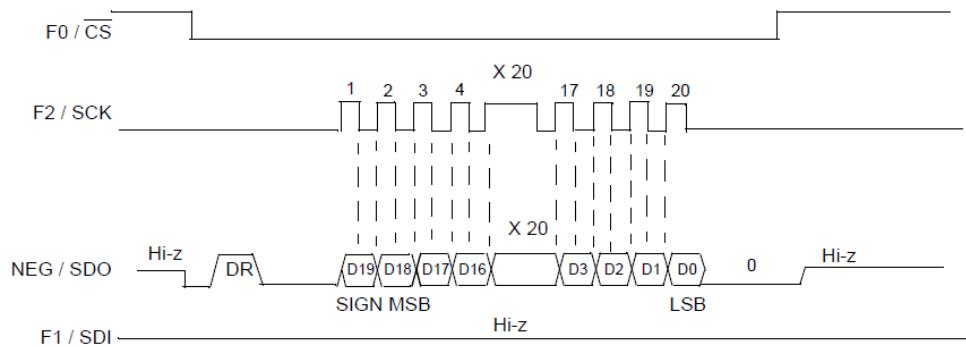


Figura C.3: Multiplier Output mode [MCP3909, 2009].

- **Dual Channel mode**

**0xA4** (Pre HPF1)

**0xAC** (Post HPF1)

Estas instruções fazem com que o analisador devolva os dados relativos à corrente e tensão. A diferença entre elas reside no facto de os dados serem recolhidos antes ou após o filtro passa alto, ver diagrama de blocos da figura 1.4 blocos. Os dados devolvidos têm 32 bits sendo que os primeiros 16 correspondem à tensão e os restantes 16 à corrente, como é possível verificar na figura C.4.

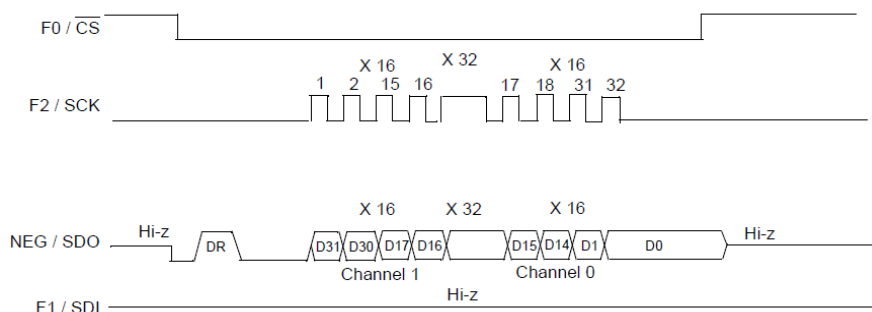


Figura C.4a: Dual Channel mode [MCP3909, 2009].

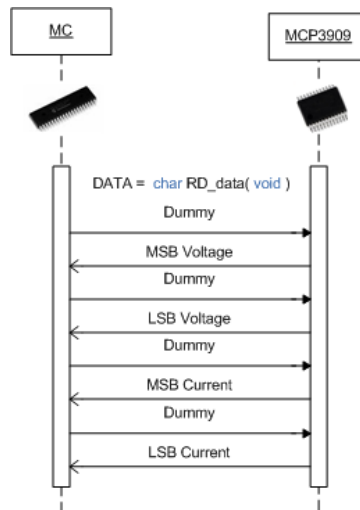


Figura C.4b: Troca de mensagens SPI.

- **Filter Input mode**

**0xAA** (F2 pin = 1, F1 pin = 0)

**0xAE** (F2 pin = 1, F1 pin = 1)

**0xA2** (F2 pin = 0, F1 pin = 0)

**0xA6** (F2 pin = 0, F1 pin = 1)

Estas instruções permitem atribuir um valor ao multiplicador que se encontra antes do filtro passa baixo (LPF), ver Figura 3.10. A diferença entre elas reside no estado dos pinos F1 e F2. Quando o analisador se encontra neste modo de operação não é possível recolher dados. O valor do multiplicador só pode ser enviado após de surgir o pulso “DR” na linha de saída de dados, ver figura C.5.

O multiplicador ocupa 20 bits e tal como foi referido anteriormente, devido à estrutura das mensagens SPI terão que ser enviados 24 bits sendo que os 4 últimos são 0. O valor a enviar deve encontrar-se na notação de complemento para 2 [MCP3909, 2009].

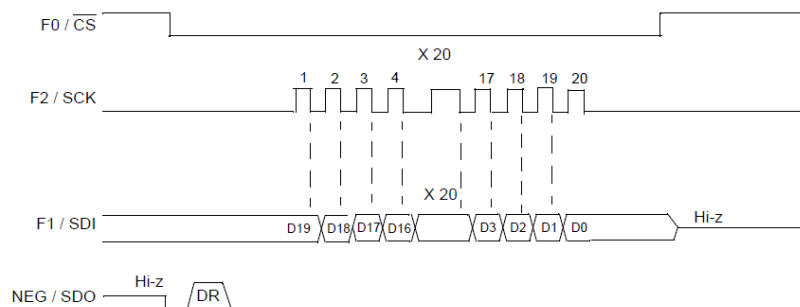


Figura C.5: Filter Input mode [MCP3909, 2009].

De seguida é apresentado um exemplo de leitura dos dados recolhidos pelo MCP3909 através da sua interface SPI. Para comunicar com o analisador é utilizado o micro-controlador PIC16F877A, posteriormente os dados são enviados para um computador através de RS232. A Figura C.6 mostra o diagrama de fluxo do *software* do micro-controlador.

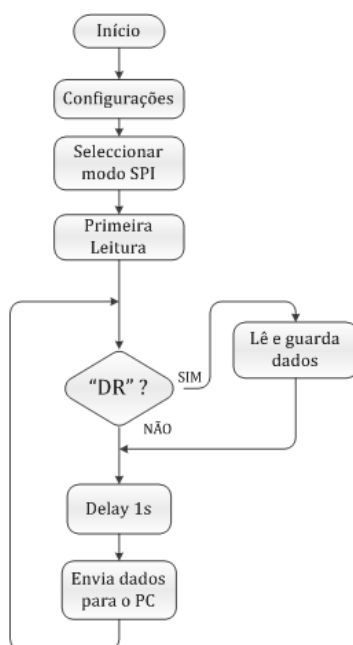


Figura C.6: Diagrama de fluxo do software do micro-controlador.

Após a inicialização do micro-controlador são feitas as configurações, necessárias tais como portas de entrada e saída, comunicações série (RS232 e SPI) e temporizadores. Seguidamente é enviada a instrução para seleccionar o modo de operação SPI, deve ter-se em atenção que o analisador suporta apenas um modo de operação 0,1. O que corresponde a CKP = 0 e CKE = 0. Quanto à amostragem do sinal é indiferente ser feita a meio ou no fim. Neste exemplo opta-se por SMP = 0.

Para que o analisador comece a apresentar o resultado das conversões é necessário efectuar uma primeira leitura e descartar o resultado. Este facto foi apurado experimentalmente e não consta no manual do analisador.

Dadas as especificações do protocolo SPI do analisador, é necessário criar uma RSI (Rotina de Serviço de Interrupção) para que o pulso “DR” seja detectado. Esta RSI é responsável por ler e armazenar os dados em variáveis temporárias. Como o analisador disponibiliza os dados a uma cadência relativamente elevada opta-se por enviar para o computador a uma cadência inferior, a cada 1 segundo. De seguida são descritas as funções mais relevantes.

- **Mode select**

```
void mode_select ( char mode )
{
    RA3=0;           // MCLR
    DELAYm(1);       // Delay de 1 mili-segundo.
    RA3=1;
    NOP();           // Delay.
    RA4=0;           // Pino CS.
    WR_BYTE(mode);   // Instrução.
    RA4=1;           // Pino CS.
}
```

Esta função permite enviar uma mensagem SPI para o analisador para seleccionar o modo de operação SPI abordado anteriormente.

Começa-se por o reiniciar o analisador, baixando e elevando logo de seguida o nível lógico do pino MCLR. De seguida é seleccionado o analisador, baixando o nível lógico do pino CS. A instrução deve ser enviada num intervalo de tempo específico. Imediatamente após reiniciar o analisador deve-se aguardar  $t_{\text{WINSET}}$ , no entanto a instrução deve ser enviada antes de decorrer  $t_{\text{WINDOW}}$ . Estes tempos dependem do cristal utilizado tal como foi referido anteriormente. No final é necessário subir o nível lógico do pino CS.

- **RD\_data**

```
void RD_data(void)
{
    char Dummy = 0x00; // Variável temporária.
    RA4 = 0;           // pino CS.
    H_Voltage = RD_BYTE(); // Lê e armazena os dados relativos à tensão.
    L_Voltage = RD_BYTE();
    H_Current = RD_BYTE(); // Lê e armazena os dados relativos à corrente.
    L_Current = RD_BYTE();
}
```

Esta função é executada sempre que ocorre uma interrupção por hardware no pino RB0. Pretende-se que a interrupção seja gerada pelo pulso “DR”, referido anteriormente. Assim sendo o pino SDO do analisador, para além de ser conectado ao pino SDI do micro-controlador deverá também ser conectado ao pino RB0. O pulso “DR” indica que existem novos dados prontos para serem lidos, assim sendo a função RD\_data encarrega-se de os ler os dados e

armazenar em variáveis. Aquando da configuração das interrupções deve-se definir que a interrupção ocorre no flanco descendente do pulso “DR”. Para tal o bit INTEDG deve ser 0.

No modo de operação seleccionado o analisador devolve 4 bytes de dados, pelo que é necessário fazer quatro leituras de dados.

### Tratamento de dados relativos ao canal de tensão

O analisador MCP3909 dispõe de ADC’s de 16 bits. Na verdade, 1 bit corresponde ao sinal pelo que restam 15 bits de dados. Assim sendo como resultado da leitura obtêm-se 2 bytes de dados relativos ao canal de tensão e 2 bytes relativos ao canal de corrente, representados na figura C.7, por MSB (*Most Significant Byte*) e LSB (*Less Significant Byte*).

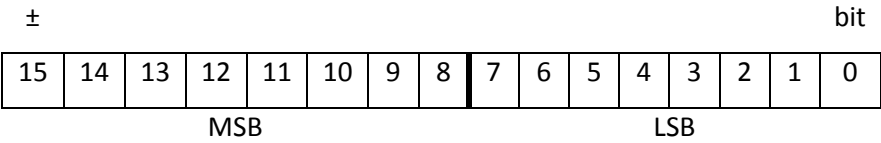


Figura C.7: Estrutura de dados devolvidos pelo analisador.

Os bits menos significativos do resultado da conversão da ADC são os mais afectados pelo ruído electromagnético, pelo que é usual descartar os últimos bits. No caso de uma ADC de 16 bit seria aceitável descartar os 2-3 bits menos significativos. Experimentalmente verificou-se que o ruído afectava mais do que 3 bits pelo que é necessário descartar 4-5 bits. Para tal é necessário criar uma “máscara” de bits para aproveitar apenas os 4 bits mais significativos do LSB, ver figura C.8. Assim sendo o novo LSB\* é o resultado da comparação lógica “e” entre o LSB e a máscara.

	bit							
<b>LSB</b>	7	6	5	4	3	2	1	0
<b>Máscara</b>	1	1	1	1	0	0	0	0
<b>LSB*</b>	7	6	5	4	0	0	0	0

Figura C.8: Resultado da comparação lógica.

É necessário agrupar estes bytes numa única variável. O formato Short Int (16 bits) é suficiente para armazenar os dois bytes de dados. Seja Volt a variável que armazena os dados relativos ao canal de tensão, tem-se a seguinte equação:

$$Volt = MSB * 256 + LSB$$

Depois de apurado o resultado da conversão é necessário transformar esse resultado num valor de tensão. A tensão máxima à entrada do canal de tensão situa-se em torno dos  $\pm 660$  mV, a partir deste limite a linearidade não está garantida.

Quando se pretende medir uma tensão em torno dos 230 V<sub>RMS</sub> é necessário utilizar um transdutor de tensão ou um divisor resistivo com um factor de redução tal que garanta uma tensão à entrada do canal de tensão igual ou inferior a  $\pm 660$  mV. Entenda-se por factor de redução o quociente entre a tensão da rede e a tensão à entrada da ADC do analisador. A Microchip sugere um factor de redução de 442:1 [REFERENCE DESIGN, 2008].

No manual do analisador [MCP3909, 2009] encontra-se a fórmula que relaciona o valor resultante da conversão com a diferença de potencial à entrada da ADC do analisador,

$$Channel\ code\ 1 = \frac{V_{IN+} - V_{IN-}}{V_{REF}} * 32768 * \sqrt{8.06 * \frac{0.47}{0.66}}$$

Em que “Channel 1 Code” representa o resultado da conversão e V<sub>REF</sub> a tensão de referência, neste caso V<sub>REF</sub> = 2.4V. A segunda parcela representa o valor máximo que o analisador pode devolver e a última parcela está relacionada com os valores máximos de tensão no canal de tensão e corrente, respectivamente 660 mV e 470 mV. Conhecendo o factor de redução e tendo em conta a equação de conversão apresentada pela Microchip é possível deduzir uma equação que traduz a relação entre a tensão da rede eléctrica que se pretende medir e o resultado da conversão da ADC do analisador,

$$Channel\ code\ 1 = \frac{V_{IN+} - V_{IN-}}{V_{REF}} * 32768 * \sqrt{8.06 * \frac{0.47}{0.66}} * Factor\ de\ redução$$

## Problemas durante o desenvolvimento do *software*

- **Seleccionar modo de operação SPI**

Neste caso a dificuldade encontrada foi enviar a instrução para seleccionar o modo de operação SPI do analisador para que este permitisse a leitura dos dados.

O problema prendia-se com o intervalo de tempo disponível para enviar a instrução, discutido anteriormente. Inicialmente, quer o analisador que o micro-controlador estavam a operar com um cristal de 4MHz o que impossibilitava enviar a instrução no período de tempo determinado. A solução passou por utilizar um cristal mais rápido no micro-controlador. O cristal seleccionado foi de 20MHz.

- **Leitura de dados**

Sempre que existem dados novos para serem lidos, o analisador envia um pulso “DR” para o pino SDO e só de seguida envia os dados. Inicialmente este pulso estava a ser interpretado como dados, pelo que as leituras não faziam sentido. Depois de analisar um desenho de referencia da Microchip conclui-se que este pulso teria que ser utilizado como uma interrupção. Para tal o pino SDO do analisador foi conectado também ao pino RB0 do micro-controlador. A RSI desta interrupção encarrega-se de ler e armazenar os dados.

- **Primeira leitura**

Depois de resolvidos os problemas anteriores verificou-se que após seleccionar o modo de operação SPI do analisador este não enviava, quer o pulso “DR” quer os dados, tal como seria de esperar. A solução encontrada para este problema passou por efectuar uma primeira leitura dos dados fora da RSI para que o analisador começasse a operar de forma correcta.

- **Ruído electromagnético**

O facto de ter os componentes montados numa placa de teste em simultâneo com outros dispositivos é certamente uma das causas de ruído electromagnético. No entanto os níveis de ruído encontrados são algo excessivos uma vez que afectam pelo menos 4 bits da conversão



das ADC's. O facto de descartar 4 bits diminui a resolução na medida, outra consequência do ruído é facto de apresentar valores negativos quando se medem diferenças de potencial positivas muito próximas de 0V.

## Notação de complemento para 2

A notação de complemento para 2 (em inglês *two's complement*) é uma forma de representar quantidades que podem tomar valores positivos ou negativos. A notação binária apenas permite representar valores inteiros positivos [RORVIK, 2003]. Como as grandezas medidas pelo analisador MCP3909 podem assumir valores positivos e negativos, os dados são apresentados segundo a notação de complemento para 2.

Com 8 bits em notação binária é possível representar valores inteiros compreendidos entre 0 e 255, com os mesmos 8 bits em notação de complemento para 2 é possível representar valores inteiros compreendidos entre -128 e +127 ou para um caso geral  $-2^{N-1}$  e  $+2^{N-1}-1$ , em que N representa o número de bits. Para representar um valor, que em notação binária tem N bits, em notação de complemento para 2 terá N+1 bits.

O bit mais significativo de um conjunto de bits indica se o valor é positivo no caso de ser 0 ou negativo no caso de ser 1. A tabela 1 mostra alguns exemplos de valores representados na notação de complemento para 2.

Tabela C.2. Exemplos de notação de complemento para 2.

Complemento para 2	Decimal
0 1111111	127
0 0000001	1
0 0000000	0
1 1111111	-1
1 0000001	-127
1 0000000	-128

Uma das formas de converter um valor decimal em notação de complemento para 2 passa por converter em primeiro lugar para notação binária. Se o valor a converter for **positivo**

ou **nulo**, a notação de complemento para 2 corresponde à notação binária. Não esquecendo o facto que bit mais significativo toma o valor 0.

Se o valor a converter for **negativo**, a notação de complemento para 2 desse valor corresponde à subtracção binária de uma unidade (ao módulo do valor) seguida de uma inversão bit a bit.

Existe uma forma alternativa de efectuar a conversão de um valor **negativo**. Tome-se como exemplo o valor decimal **-6**. Em notação binária o seu módulo é **0b110**. Note-se que este valor pode ser representado por 3 bits, então em notação de complemento para 2 terá 4 bits sendo que o mais significativo é 1. Portanto, será algo do género **1xxx**. O valor, binário, a colocar em “xxx” será o equivalente ao valor binário da subtracção  $2^N - 6$ , em que N é o menor número mínimo de bits que permite representar o valor **6** (3 neste caso). Então o valor **-6** pode ser representado em notação de complemento para 2 por **1010**.

O processo inverso, converter notação de complemento para 2 para decimal, realiza-se de forma semelhante apenas se deve inverter a ordem das operações. De seguida ficam alguns exemplos de conversões.

- Converter o valor decimal **5**

1º passo - converter para binário

$$5D = 0b101$$

2º passo – como se trata de um valor positivo o bit mais significativo é 0.

$$5D = 0101$$

- Converter o valor **-7**

1º passo - converter para binário

$$7D = 0b111$$

2º passo – como se trata de um valor negativo o bit mais significativo é 1.

Subtrair 1      0b110

Inverter        0b001

$$7D = 1001$$

Pelo Segundo método apresentado,

$$2^3 - 7 = 1$$

$$7D = \underline{1001}$$

- Converter **101001** para decimal

Como o bit mais significativo é 1 significa que se trata de um valor negativo.

101001  
└───────────▶ 5 bits

0b**01001** = 9D

$$9 - 2^5 = -23D$$

O valor **101001** em notação de complemento para 2 corresponde ao valor decimal **-23**.



# Referências

[ABEL] **Abel Eclairage** [Em linha]. França : Abel. [Consult. Set. 2010]. Disponível em WWW :<URL: [http://www.abeleclairage.fr/home.php?v\\_lang=EN&page=1](http://www.abeleclairage.fr/home.php?v_lang=EN&page=1)>.

[ALTRON] **Abel catalogue** [Em linha]. França : Augier. [Consult. Set. 2010]. Disponível emWWW:<URL:[http://www.abeleclairage.fr/mp\\_pdf/12010\\_ABEL\\_-\\_catalogue\\_appareillages\\_2601.pdf](http://www.abeleclairage.fr/mp_pdf/12010_ABEL_-_catalogue_appareillages_2601.pdf)>. p. 11-39, 41.

[AN718] Pazul, Keith. **Controller Area Network (CAN) Basics**. Microchip Technology Inc. [Em linha]. actual. 2002. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00713a.pdf>>.

[AN1006] Kvasnicka, Martin. **Interfacing SPI™ Serial EEPROMs to PIC18 Devices**. Microchip Technology Inc. [Em linha]. actual. 2005. [Consult. Mar. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01006a.pdf>>.

[ANDRÉ] André, Anderson Soares - **Sistema Electrónico Para Lâmpadas De Vapor de Sódio De Alta Pressão**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 2004. Tese de Doutoramento.

[ASTERPORTAL] **Poluição Luminosa**. [Em linha]. actual. 2009. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.asterportal.org/pl/pl.htm>>.

[AUGIER] **Augier Energy** [Em linha]. França : Augier. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://www.augiersa.com/index.php/en/>>.

[AUGIER-BOX] **Augier-box®** [Em linha]. França : Augier. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://www.augiersa.com/augier/pdf/uk/6011432.pdf>>.

[BAKSHI] Bakshi, U. A. [et. al] – **Electronic Measurements & Instrumentation** 1ª ed. Pune: Technical Publications Pune, 2007. ISBN: 81-89411-73-X.

[BARR] Barr, Michael **Pulse Width Modulation** [Em linha]. actual. 2001. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://www.netrino.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>>.

[CEP/TEV] **Tev2** [Em linha]. Portugal : Tev2. [Consult. Set. 2010]. Disponível em WWW:<URL: [http://www.tev-electric.eu/main.php?id=468&tbl=\\_trubricas](http://www.tev-electric.eu/main.php?id=468&tbl=_trubricas)>. (com problemas de acesso à data da consulta)

[COMPACTO] **Compacto®** [Em linha]. França : Augier. [Consult. Set. 2010]. Disponível emWWW :<URL: <http://www.augiersa.com/augier/pdf/uk/6011352.pdf>>.

[DEURSEN] Theo Van Deursen **Campanha de Sensibilização Philips** [Em linha]. Actual. 2006. [Consult. Out. 2010]. Disponível em WWW:<URL: [http://www.newscenter.philips.com/pt\\_pt/standard/about/news/press/article-14576.wpd](http://www.newscenter.philips.com/pt_pt/standard/about/news/press/article-14576.wpd)>.

[DGEG] Direcção Geral de Energia e Geologia **Preços da energia de 2008** [Em linha]. actual. 2008. [Consult. 29 Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://www.dgge.pt?cfl=1468>>.

[DIGI] **Digi International** [Em linha]. [Consult. Out. 2010]. Disponível em WWW:<URL: [http://www.digi.com/pdf/css\\_hafslund.pdf](http://www.digi.com/pdf/css_hafslund.pdf)>.

[ENERGAIA] Almeida, Jorge - **Gestão de Energia na Iluminação Pública**. Ficheiro de apresentação do projecto ge.IP. 2010.

[FARAHANI] Farahani, Shahin – **ZigBee Wireless Networks and Transceivers**. 1ª ed. Burlington: Newnes, 2008. ISBN: 978-0-7506-8393-7.

[FERNANDES] Fernandes, Ivo Oliveira **GSM/GPRS** [Em linha]. actual. 2006. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/celulares/celulares.html>>.

[FARNELL] Farnell Portugal [Em linha]. Disponível na WWW: <URL: <http://pt.farnell.com/>>.

[IBRAHIM] Ibrahim, Dogan – **SD Card Projects Using The PIC Microcontroller**. 1ª ed. Burlington: Newnes, 2010. ISBN: 978-1-85617-719-1.

[INFOWESTER] **Tecnologia Bluetooth** [Em linha]. actual. 2010. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://www.infowester.com/bluetooth.php>>.

[INIEWSKI] Krzysztof, Iniewski – **Convergence of Mobile and Stationary Next-Generation Networks**. 1ª ed. New Jersey: Wiley, 2010. ISBN 1-56592-660-9

[KASIM] Kasim, Abdul [et. al] – **Delivering Carrier Ethernet: Extending Ethernet Beyond the LAN**. 1ª ed. New york: McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-0-07-148747-4

[KIOSKEA] **O Padrão GSM/GPRS** [Em linha]. actual. 2009. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://pt.kioskea.net/contents/telephonie-mobile/gsm.php3>>.

[LITES] **Intelligent street lighting for energy saving** [Em linha]. [Consult. Set. 2010].Disponível em WWW:<URL: <http://www.lites-project.eu/pt-pt>>.

[LTS15NP] **Current Transducer LTS 15-NP**. Lem. [Em linha]. [Consult. 20 Set. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.farnell.com/datasheets/51625.pdf>>.

[LV25P] **Voltage Transducer LV 25-P**. Lem. [Em linha]. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.farnell.com/datasheets/51633.pdf>>.

[MAANI] **XML/SWF Charts** Maani. [Em linha]. actual. 2010. [Consult. Ago. 2010]. Disponível na WWW:<URL: [http://www.maani.us/xml\\_charts/](http://www.maani.us/xml_charts/)>.

[MCP3909] **Energy Metering IC with SPI Interface and Active Power Pulse Output**. Microchip Technology Inc. [Em linha]. actual. 2009. [Consult. Abr. 2010]. Disponível na WWW: <URL:<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22025b.pdf>>.

[MICROCHIP] **Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface**. Microchip. [Em linha]. actual.2002. [Consult. 26 Abr. 2010]. Disponível na WWW: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/spi.pdf>>.

[M25PE16] **M25PE16 Datasheet**. Numonyx. [Em linha]. actual. 2008. [Consult. 20 Abr. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://www.numonyx.com/Documents/Datasheets/M25PE16.pdf>>.

[MSDN] **Getting Started with Visual Basic** [Em linha]. Microsoft Corporation. actual. 2010. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/vbasic/bb466159>>.

[MYSQL] **Why MySQL?** [Em linha]. Oracle Corporation. actual. 2010. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://www.mysql.com/why-mysql>>.

[OPA277] **High Precision Operational Amplifiers**. Burr-Brown. [Em linha]. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.farnell.com/datasheets/9254.pdf>>.

[OPERA] **Reverberi Enetec** [Em linha]. Itália : Reverberi. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://www.reverberi.it/prodotti/opera.pdf>>.

[PESTANA] Pestana, Luís Miguel **Transformadores Especiais** [Em linha]. actual. 2008. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestana/textos%20de%20alunos/TransfEsp.htm>>.

[PIC16F877xA] **PIC16F87XA Datasheet** Microchip Technology Inc. [Em linha]. actual. 2003. [Consult. Mar. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>>.

[PHP] **PHP** The PHP Group. [Em linha]. actual. 2010. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://pt2.php.net/>>.

[PHPLOT] **PHPlot** SourceForge. [Em linha]. actual. 2010. [Consult. 29 Set. 2010]. Disponível na WWW:<URL: <http://phplot.sourceforge.net/>>.

[PORDATA] **Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo** [Em linha]. actual. 2010. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW: <URL: [http://www.pordata.pt/azap\\_runtime/?n=4](http://www.pordata.pt/azap_runtime/?n=4)>.

[REFERENCE DESIGN] **MCP3909 3-Phase Energy Meter Reference Design Using the PIC18F2520**. Microchip Technology Inc. [Em linha]. actual. 2008. [Consult. Mai. 2010]. Disponível na WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51643b.pdf>>.

[RIBEIRO] RIBEIRO, Luís Botelho. (2006) **Comunicações via MODEM AT**. [Consult. 18 Mar. 2010]. Disponível na WWW: [http://dei-s1.dei.uminho.pt/pessoas/ribeiro/comandosAT\\_sobre\\_GSM.pdf](http://dei-s1.dei.uminho.pt/pessoas/ribeiro/comandosAT_sobre_GSM.pdf).

[RORVIK] Dawn, Rorvik. **2's Complement Representation for Signe Integers** [Em linha]. actual. 2003. [Consult. Jun. 2010]. Disponível na WWW: <[URL: http://academic.evergreen.edu/projects/biophysics/technotes/program/2s\\_comp.htm](http://academic.evergreen.edu/projects/biophysics/technotes/program/2s_comp.htm)>.

[SANTIAGO] Santiago, Catarina [et. al] **Controlo de fase** [Em linha]. actual. 2006. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<[URL: http://paginas.fe.up.pt/~ee04249/iVlab/documentacao/Controlo\\_Fase\\_V2.1.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ee04249/iVlab/documentacao/Controlo_Fase_V2.1.pdf)>.

[SCHREDER] **LED o futuro da iluminação?** [Em linha] . actual. 2008. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW: <[URL: http://www.schreder.com/documents/\\_Dossier/PDF/Portuguese/200805071621254/LEDsTheFutureOfLightingPO.pdf](http://www.schreder.com/documents/_Dossier/PDF/Portuguese/200805071621254/LEDsTheFutureOfLightingPO.pdf)>.

[SCIENCEPROG] **Microwire compared to SPI and I2C**. [Em linha]. actual. 2008. [Consult. 20 Abr. 2010]. Disponível na WWW:<[URL: http://www.scienceprog.com/microwire-compared-to-spi-and-i2c/](http://www.scienceprog.com/microwire-compared-to-spi-and-i2c/)>.

[SMARTLI] **SmartLi** [Em linha]. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<[URL: http://www.smartli.net/SmartLi\\_E\\_T\\_10\\_12\\_09PT.pdf](http://www.smartli.net/SmartLi_E_T_10_12_09PT.pdf)>.

[SPURGEON] Spurgeon, Charles E. – **Ethernet: The Definitive Guide** 1ª ed. Sebastopol: O'Reilly Média Inc, 2000. ISBN: 1-56592-660-9.

[TEIXEIRA] Teixeira, Arminio **Técnicas de iluminação** [Em linha] . actual. 2003. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<[URL:http://paginas.fe.up.pt/~arminio/teci/apontamentos.html](http://paginas.fe.up.pt/~arminio/teci/apontamentos.html)>.

[TEXAS] Corrigan, Steve. **Controller Area Network Physical Layer Requirements** Texas Instruments. [Em linha]. actual. 2008. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW: <[URL: http://focus.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf](http://focus.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf)>.

[TRAVASSOS], Travassos, Francisco António Martins - **Sistema Automático de Monitorização do Consumo de Energia e Temperatura de uma Estação de Radiocomunicações Móveis da Vodafone** : Lisboa: Instituto Superior Técnico. 2008. Dissertação de Mestrado.

[WORDSWORTH] Wordsworth, Saul - Street Smart. **Traffic Technology International** [Em linha]. Jan 2010, p 38-44. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW:<[URL: http://viewer.zmags.com/publication/6e26c868#/6e26c868/1](http://viewer.zmags.com/publication/6e26c868#/6e26c868/1)>.



[XAMPP] **Xampp** [Em linha]. Apache Friends. actual. 2010. [Consult. Set. 2010]. Disponível na WWW :<URL: <http://www.apachefriends.org/en/xampp.html>>.

[XBEE] **XBee RF Modules Datasheet** [Em linha]. Digi International. actual. 2009. [Consult. 26 Mar. 2010]. Disponível na WWW:<URL: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_B.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_B.pdf)>.

[YOUSULF] Yousulf, Muhammad Salman [*et. al*] – Power Line Communications: An Overview – Part I. **4<sup>th</sup> International conference on Information Technology** [Em linha]. (2007), p. 218-222. [Consult. Out. 2010]. Disponível na WWW: <URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4430363>>. ISBN: 978-1-4244-1841-1